

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Procedimiento de análisis predictivo en motores de
inducción mediante la transformada de Hilbert**

Jans Mario Llacua Toscano

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2020

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de "[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Perú](#)"

ASESOR

Ing. Celso José Espejo Medina

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ayudarme a través de aquellas coincidencias que hicieron posible mi desarrollo personal y profesional según lo que anhelaba realizar hasta el día de hoy.

A la universidad continental, por brindar una buena enseñanza haciendo posible el desarrollo académico de muchas personas con miras profesionales.

Al ingeniero Celso José Espejo Medina, por su valioso apoyo incondicional en calidad de asesor de la presente tesis.

A mi familia, por darme buenas lecciones, valores, por apoyarme a ser cada vez mejor y brindarme la oportunidad de ser profesional.

Finalmente, a todas las personas que han formado parte de mi vida académica y privada a las que agradezco su amistad, consejo, apoyo, ánimo y compañía, que me brindaron en diversos momentos.

DEDICATORIA

A mi padre, por haber luchado tanto para darme la oportunidad de ser profesional, por haberme enseñado valiosos valores desde que era pequeño, ya que, gracias a ello, hoy en día soy el reflejo de esas enseñanzas.

A mi madre, por corregirme con mano dura en cada acción que realicé en el transcurso de mi crecimiento y alentarme siempre a lograr mis metas.

A mi abuelito, por atenderme, demostrarme su grandioso afecto y preocupación siempre.

A mi hermano por regalarme su alegría y cariño incondicional en todo momento.

ÍNDICE

PORTADA	I
ASESOR	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE	V
LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN	XII
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1. Características del problema	13
1.1.1.Planteamiento y formulación del problema	13
1.2. Formulación del problema	15
1.2.1.Problema general	15
1.2.2.Problema específico	15
1.3. Objetivos	15
1.3.1.Objetivos generales	15
1.3.2.Objetivos específicos.....	15
1.4. Justificación del tema	16
1.5. Formulación de hipótesis	16
1.5.1.Hipótesis general.....	16
1.5.2.Hipótesis específico.....	17
1.6. Identificación de las variables	¡Error! Marcador no definido.
1.6.1.Variable independiente	17
1.6.2.Variable dependiente.....	17
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes del problema	18
2.1.1.Antecedentes internacionales	18
2.1.2.Antecedentes nacionales.....	20
2.1.3.Antecedentes regionales	21
2.2. Bases teóricas	23
2.2.1.La transformada de hilbert	23
2.2.2.Envoltente de una señal periódica	25
2.2.3.Interpretación de los espectros de frecuencia.....	25
2.2.4.Fallas en motores de inducción de baja potencia.....	28
2.2.5.Estimación de los parametros del motor de inducción	37
2.2.6.Fallas por desbalance de tensión	59
2.2.7.Análisis espectral de corriente	61
2.2.8.Confiabilidad y predicción de fallas.....	62
2.2.9.Diagnóstico de estado de motores y evaluación alternas de mantención.....	62
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. Metodología de la investigación.....	65

3.1.1. Método científico.....	65
3.1.2. Método general.....	65
3.1.3. Tipo de investigación	65
3.1.4. Nivel de investigación	66
3.2. Población y muestra	66
3.3. Instrumentos de recopilación de datos.....	66
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. Aplicación práctica.....	67
4.1.1. Selección de la muestra.....	68
4.1.2. Toma de datos.....	68
4.1.3. Equipo utilizado	69
4.2. Resultados del analizador de redes	70
4.2.1. Fallas en rodamiento	70
4.2.2. Fallas en rotor.....	74
4.2.3. Fallas en excentricidad	79
4.2.4. Fallas en el estator	83
4.3. Prueba de hipótesis.....	104
4.4. Discusión de resultados.....	110
CONCLUSIONES.....	116
RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
ANEXOS	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de frecuencia para motor con barras cortadas	26
Tabla 2. Componentes de frecuencias para un motor saturado y excéntrico	26
Tabla 3. Componentes de frecuencia para un motor con falla en rodamiento	27
Tabla 4. Componentes de frecuencia para detección de corto circuito de espiras en flujo axial	27
Tabla 5. Criterio de diagnóstico de daños en barras del motor.	62
Tabla 6. Variables que caracterizan la señal en tiempo y frecuencia.	90
Tabla 7. Variables para la respuesta en frecuencia de una señal de 3200 muestras en el M6.	92
Tabla 8. Frecuencia de falla análisis clásico y de envolvente.....	94
Tabla 9. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente.	95
Tabla 10. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente.	96
Tabla 11. Detalles De Las Fallas De Los Motores De Inducción Trifásicos En C.A. En La Empresa Atlas.	105
Tabla 12. Criterios De Evaluación Según Los Intervalos De Fallas En Los Motores Trifásicos En C.A.	107
Tabla 13. Nos muestra las diferentes medidas de frecuencia de fallas. .. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 14. Frecuencia de falla análisis clásico y de envolvente.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (A) (B), La falla del rotor (barra del rotor rota)	42
Figura 2. Excentricidad estática: generado por (A) estator	45
Figura 3. Trazo descrito por una máquina eléctrica rotativa	46
Figura 4. Excentricidad dinámica generada por: rotor ligeramente ovalado (B) eje de giro del rotor no coincide con su centro de masas.	47
Figura 5. Trazo descrito por una máquina eléctrica rotativa con excentricidad dinámica.	47
Figura 6. Trazo en la misma figura de dos excentricidades	48
Figura 7. Excentricidad mixta.	48
Figura 8. Excentricidad axial. (5)	49
Figura 9. Fallas en el aislamiento típicamente	50
Figura 10. Motor y carga alineados	55
Figura 11. (A) Deterioro de la cara exterior, (B) deterioro	56
Figura 12. Engranajes planetarios (8)	59
Figura 13. Consecuencia del desbalance de tensión	60
Figura 14. Equipo analizador de redes	69
Figura 15. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras	70
Figura 16. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras	71
Figura 17. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras	72
Figura 18. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras	72
Figura 19. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras	73
Figura 20. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras	73
Figura 21. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras	74
Figura 22. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras	75
Figura 23. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras	75
Figura 24. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras	76
Figura 25. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras	77
Figura 26. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras	77
Figura 27. Amplitud de corriente para el motor M2	78
Figura 28. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras	79
Figura 29. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras	79
Figura 30. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras	80
Figura 31. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras	81
Figura 32. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras	81
Figura 33. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras	82
Figura 34. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras	83
Figura 35. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras	84
Figura 36. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras	84
Figura 37. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras	85
Figura 38. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras	86
Figura 39. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras	86
Figura 40. Amplitud de corriente para el motor M2	87
Figura 41. Amplitud de corriente para el motor M3 de la muestra	88
Figura 42. Amplitud de corriente para el motor M4 de la 640	88
Figura 43. Respuesta en frecuencia mediante fourier en el M4.	91

Figura 44. Fourier de la señal de 1600 en el M5 muestras.....	93
Figura 45. Respuesta en frecuencia análisis clásico	97
Figura 46. Respuesta de frecuencia para La envolvente del motor M2	97
Figura 47. Respuesta en frecuencia análisis clásico	98
Figura 48. Respuesta en frecuencia para la envolvente.....	99
Figura 49. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente	99
Figura 50. Zoom respuesta en frecuencia.....	100
Figura 51. Respuesta en frecuencia análisis clásico	101
Figura 52. Respuesta en frecuencia para la envolvente.....	101
Figura 53. Respuesta en frecuencia análisis clásico	102
Figura 54. Respuesta en frecuencia para la envolvente.....	103
Figura 55. Respuesta en frecuencia análisis clásico	103
Figura 56. Respuesta en frecuencia para la envolvente.....	104
Figura 57. Diagrama de resultados	107

RESUMEN

Algunos años atrás el personal de mantenimiento ha estado sumamente limitado al tratar de diagnosticar fallas en motores eléctricos, y peor aún sobre la marcha del motor. Las herramientas más comunes han sido un medidor de aislamiento (megger) y un ohmímetro. Aunque recientemente el análisis de vibraciones ha ayudado a determinar fallas de tipo eléctrico en motores, no se puede asumir que un pico a 2 veces la frecuencia de línea es una falla de tipo eléctrico. Se tendrán en cuenta otras variables antes de sacar un motor de servicio. Aún con el megger muchas anomalías pueden ser pasadas por alto. El determinar problemas en motores debe ser confiable y seguro, por eso un análisis de motores eléctricos debe contener resultados en las siguientes zonas de falla: Circuito de potencia, aislamiento, estator, rotor, entrehierro y calidad de energía. Las pruebas a realizar deben de contemplar pruebas tanto con motor detenido como con motor energizado; he ahí el aporte de las transformadas de Hilbert.

Para darle un enfoque adecuado al tema se tuvo que plantear las bases de la tesis y darle un marco teórico adecuado, se resaltó bastante en el análisis de fallas en los motores de inducción y finalmente se trató el método de la corriente estatórica mediante espectros sin la frecuencia fundamental el cual es realizado por las transformadas de Hilbert. Para el mejor entendimiento de la tesis se dividió en cuatro capítulos:

CAPÍTULO 1: Planteamiento del problema de investigación.

CAPÍTULO 2: Antecedentes y marco teórico.

CAPÍTULO 3: Metodología de la investigación.

CAPÍTULO 4: Resultados y discusión.

ABSTRACT

A few years ago maintenance personnel have been extremely limited in trying to diagnose failures in electric motors. And worse still on the engine. The most common tools have been an insulation meter (megger) and an ohmmeter. Although the vibration analysis has recently helped to determine electrical type failures in motors, it cannot be assumed that a peak at 2 times the line frequency is an electrical type fault. Other variables must be taken into account before taking out a service engine. Even with the megger many anomalies can be overlooked. The determination of motor problems must be reliable and safe, so an analysis of electric motors must contain results in the following fault zones: Power Circuit, Isolation, Stator, Rotor, Air gap and Energy quality. The tests to be carried out must include tests with both the engine stopped and the engine powered; here is the contribution of Hilbert's transforms.

In order to give an adequate approach to the subject, the bases of the thesis had to be laid out and given an adequate theoretical framework, it was quite emphasized in the analysis of failures in induction motors and finally the method of the static current was treated by means of spectra without the fundamental frequency which is performed by the Hilbert transforms. For the best understanding of the thesis it was divided into four chapters.

CHAPTER 1: Formulating the research problem.

CHAPTER 2: Background and theoretical framework.

CHAPTER 3: Investigation methodology.

CHAPTER 4: Results and discussion.

INTRODUCCIÓN

Las industrias siempre intentan aumentar la confiabilidad de su proceso productivo. En este contexto, el mantenimiento predictivo desempeña un papel fundamental para alcanzar una alta disponibilidad y confiabilidad con respecto a sus equipos. El mantenimiento predictivo puede entenderse como la acción sobre el equipo, el sistema o las instalaciones en función del conocimiento previo sobre la condición o el rendimiento de la operación, obtenida mediante parámetros previamente determinados (Bonaldi et al, 2007). Dado que los motores de inducción son el centro de la gran mayoría de los procesos industriales, la tesis propuesta hace hincapié en el análisis de fallas y la identificación de este tipo de máquina eléctrica. Al igual que todas las máquinas rotativas, los motores de inducción están expuestos a muchas adversidades diferentes, como tensiones térmicas y ambientales y daños mecánicos que requieren la máxima atención (Lambert-Torres et al., 2003). Por lo general, en las industrias, la atención debe ser aún mayor, ya que los costos de tiempo de inactividad son muy altos. Los motores de inducción de alta y media tensión son muy utilizados en procesos industriales. Muchos de ellos son estratégicos para el proceso productivo y, por eso, es obligatorio buscar soluciones que minimicen las estadísticas de fallas. En la mayoría de los casos, estos motores son altamente confiables y extremadamente caros, lo que obliga a la compañía a operar sin un stand-by. Muchas técnicas predictivas se aplican a estos motores para reducir el número de interrupciones no planificadas. Las técnicas más comunes aplicadas a la detección de fallas en motores de inducción son: análisis de vibraciones, análisis acústico, oscilaciones de velocidad, descargas parciales, análisis de circuitos, etc.

Las industrias, actualmente, buscan productos y servicios externos para mantenimiento predictivo. En muchos casos, la compañía de servicios externos o incluso el grupo predictivo de la planta industrial cometen errores que pueden comprometer todo el proceso de monitoreo de la condición y diagnóstico de fallas. Teniendo en cuenta este contexto, esta tesis tiene la intención de difundir conceptos importantes para guiar a las empresas que tienen su propio grupo predictivo o que desean contratar consultores o servicios especializados para obtener buenos resultados a través de prácticas generales de mantenimiento predictivo.

En esta tesis, se recoge primero una breve descripción de los distintos tipos de fallas susceptibles de ocurrencia en motores eléctricos de inducción. Posteriormente se procederá a la presentación de la técnica de las transformadas de Hilbert utilizada para detección de fallas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA

El análisis armónico de la corriente de un motor ha demostrado ser útil en el diagnóstico del estado de diferentes partes constitutivas de motores eléctricos.

La aplicación del análisis de Hilbert es exclusiva de motores de inducción. Esto no representa una dificultad en ninguna planta industrial, pues como se sabe, prácticamente más del 75% de la totalidad de los motores del parque industrial a nivel mundial son de este tipo.

La hipótesis fundamental de este análisis es que cada falla en un motor de inducción aporta un componente único a la corriente de estator, luego, aplicando la transformada de Hilbert a dicha señal, se obtiene la envolvente de cada una de los componentes, lo que permite separar el componente fundamental (60 Hz). Luego de haber eliminado el componente fundamental, es relativamente sencillo establecer un monitoreo de alguna falla en el motor, o la evolución de una anomalía en éste, comparando el espectro de frecuencias mediante la transformada de Fourier a las envolventes con las frecuencias características de las fallas a estudiar.

1.1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El mantenimiento predictivo es una disciplina que día a día cobra más importancia, debido a que fundamentalmente su aplicación ha significado grandes ahorros económicos en la industria como consecuencia de la disminución de los tiempos de falla de procesos industriales. Una de las variantes del mantenimiento predictivo es el monitoreo en línea de equipos donde se han implementado diferentes métodos

como el análisis de vibraciones, análisis cromatográfico, medición de temperaturas, estimación de niveles de ruido, etc. Uno de éstos es el monitoreo en línea de la corriente del estator, temática que se viene investigando desde principios de los años 80.

Mediante la aplicación de esta metodología a motores de inducción con rotor de jaula de ardilla en régimen permanente se busca detectar tres tipos de fallas:

- Rotura de barras en el rotor
- Cortocircuito entre espiras del estator
- Falla en rodamientos

Durante la etapa de simulación se hizo uso de modelos desarrollados previamente, donde se pueden identificar fenómenos como saturación, ranurado, excentricidades dinámicas y estáticas, y la rotura de barras. Estos métodos se complementaron con la adición de los efectos producidos por fallas en rodamientos, ya que en trabajos anteriores se lograron establecer las frecuencias, en las cuales, es posible detectar una falla de este tipo. También, se analizaron mediciones tomadas experimentalmente en pequeños motores de 5.5 HP. Finalmente, se estudiaron señales obtenidas en terreno, las cuales fueron extraídas de motores que funcionan en faenas mineras y consistieron en mediciones de corriente de estator y del flujo axial. Este último se utilizó como herramienta para detectar los cortocircuitos en bobinas del estator. Una vez establecidas las frecuencias características de las fallas a estudiar y diferenciadas las señales obtenidas, se les aplicó la transformada Hilbert para obtener la envolvente y de esta manera eliminar la presencia del componente fundamental (60 Hz). Al procesar estas envolventes con la transformada rápida de Fourier (FFT) y analizar el espectro de frecuencias se observa un desplazamiento de éstas, lo que obliga a reformular las frecuencias descritas con anterioridad permitiendo así la implantación de un nuevo esquema para la detección de fallas, pues al eliminarse la componente fundamental se hace mucho más fácil interpretar el espectro de frecuencias y controlar la evolución de una anomalía en el motor.

Dentro de las estrategias aplicadas al mantenimiento predictivo de motores de inducción, se propone utilizar el método predictivo mediante la transformada de Hilbert.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas?

1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO

- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en rodamiento en los motores de inducción en la empresa atlas?
- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en el rotor en los motores de inducción en la empresa atlas?
- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en excentricidad en los motores de inducción en la empresa atlas?
- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en el estator en los motores de inducción en la empresa atlas?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVOS GENERALES

Determinar la influencia del procedimiento del análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en rodamiento en los motores de inducción en la empresa atlas.
- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en el rotor en los motores de inducción en la empresa atlas.

- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en excentricidad en los motores de inducción en la empresa atlas.
- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en el estator en los motores de inducción en la empresa atlas.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

Justificación teórica

Considero relevante el tema sobre las transformadas de Hilbert, el cual no sólo es aplicable a las máquinas eléctricas, sino a muchos fenómenos físicos existentes en el universo; la parte teórica de este tema debería dictarse en un curso complementario tanto a las matemáticas como las máquinas eléctricas en el pre grado, por la importancia y rigurosidad matemática. Es justamente, el motivo que me inspiró a investigar sobre la teoría de las transformadas de Hilbert; esperando con esto, entender aún más a las máquinas eléctricas y por ende a la ingeniería eléctrica.

Justificación metodológica

La tipología como ya se mencionó; en esta tesis desarrollaré y haré efectivo los criterios técnicos mediante una investigación analítica deductiva y bibliográfica; correspondiente al área de las máquinas eléctricas como parte de la ingeniería eléctrica. Desde el punto de vista técnico – científico, estoy proponiendo abarcar a un nivel aceptable, lo correspondiente al diagnóstico predictivo de fallas en los motores de inducción.

Justificación práctica

Teniendo conocimientos teóricos sólidos se puede incursionar en la práctica, obviamente este estudio tendrá gran significación práctica, lo cual, repercutirá indirectamente en la parte económica y social. La factibilidad de su ejecución puede darse por ejemplo en las grandes industrias, hospitales, centros mineros, etc.

1.5. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL

El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas.

1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO

- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en rodamiento en los motores de inducción en la empresa atlas.
- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en el rotor en los motores de inducción en la empresa atlas.
- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en excentricidad en los motores de inducción en la empresa atlas.
- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en el estator en los motores de inducción en la empresa atlas.

1.6. IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES

1.6.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

- Procedimiento de análisis predictivo.

DIMENSIONES

- Comparación de dos espectros de frecuencias; una tabla estándar (máquina nueva), con una tabla de la máquina de inducción a predecir.

INDICADOR

- %

1.6.2. VARIABLE DEPENDIENTE

- Identificación de fallas.

DIMENSIONES

- Corriente de campo.
- Voltaje de armadura.
- Corriente de armadura.
- Espectro de frecuencias.

INDICADORES

- Voltaje.
- Amperios.
- Hz, KHz.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Luiz A. S. Pilotto, Andre Bianco, Willis F. Long, and Abdel-Aty Edris, “Impact of TCSC control methodologies on subsynchronous oscillations” IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, pp. 243-252; Jan. 2003.

El análisis del comportamiento transitorio de los sistemas de potencia con dispositivos del sistema de transmisión de CA flexible (FACTS) ha sido objeto de un extenso estudio en los últimos años. Los dispositivos FACTS ofrecen una alternativa poderosa para aumentar la estabilidad de los modos de oscilación torsionales de un sistema de potencia, así como para mejorar la flexibilidad operativa del sistema. De especial interés son las aplicaciones en las que los dispositivos FACTS pueden interactuar de manera no lineal con los modos de vibración torsionales de los generadores de turbinas grandes. Con la disponibilidad actual y futura de un número creciente de controladores no lineales, el inicio de las oscilaciones del sistema se está volviendo más complejo e impredecible. Durante los últimos años se han llevado a cabo una serie de estudios teóricos para comprender las propiedades básicas de la respuesta del sistema lineal a

perturbaciones pequeñas y grandes. Si bien es posible calcular el comportamiento no lineal utilizando varias técnicas, gran parte de la atención en el pasado se ha dedicado a la comprensión del rendimiento del sistema no lineal utilizando una variedad de técnicas lineales. Las principales deficiencias de estos enfoques son los requisitos de linealidad y estacionariedad o periodicidad que los hacen inválidos o poco informativos para muchas aplicaciones. Las alternativas algo más generales al análisis lineal convencional son los métodos Wavelet, la teoría de la evolución.

Presentado en la Conferencia Internacional sobre Transitorios de Sistemas de Energía (IPST'05) en Montreal, Canadá, del 19 al 23 de junio de 2005 Documento No. IPST05 – 172 espectros, y Hilbert transforman el análisis de señal. Un enfoque notablemente exitoso para estudiar el comportamiento no lineal de las series de tiempo es la técnica de Hilbert-Huang derivada por primera vez por Huang. Con esta técnica, se pueden descomponer conjuntos complicados de conjuntos de datos no lineales y no estacionarios en colecciones finitas de funciones de modo intrínseco.

N. Rostamkolai, R. J. Piwko, E. V. Larsen, D. A. Fisher, M. A. Mobarak, A. E. Poitras, "Subsynchronous torsional interactions with static VAR compensators – Influence of HVDC," IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, pp. 255-261, Feb. 1991.

"La transformada Wavelet es similar a la transformada de Fourier (o mucho más a la transformada de Fourier en ventana) con una función de mérito completamente diferente. La principal diferencia es esta: la transformada de Fourier descompone la señal en senos y cosenos, es decir, las funciones localizadas en el espacio de Fourier; por lo contrario, la transformada Wavelet utiliza funciones que se localizan tanto en el espacio real como en el de Fourier. En general, la transformada Wavelet se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$F(a,b)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\psi_{(a,b)}^*(x)dx$$

Donde * es el símbolo conjugado complejo y la función ψ es alguna función. Esta función puede elegirse arbitrariamente siempre que obedezca ciertas reglas.

Como se ve, la transformación Wavelet es, de hecho, un conjunto infinito de varias transformaciones, dependiendo de la función de mérito utilizada para su cálculo. Esta es la razón principal por la que podemos escuchar el término "transformación Wavelet" en situaciones y aplicaciones muy diferentes. También, hay muchas

formas de ordenar los tipos de transformaciones Wavelet. Aquí mostramos solo la división basada en la ortogonalidad Wavelet. Podemos usar Wavelets ortogonales para el desarrollo discreto de transformadas Wavelet y Wavelets no ortogonales para el desarrollo continuo de las transformadas Wavelet. Estas dos transformaciones tienen las siguientes propiedades:

La transformada Wavelet discreta devuelve un vector de datos de la misma longitud que la entrada. Por lo general, incluso en este vector, muchos datos son casi cero. Esto corresponde al hecho de que se descompone en un conjunto de Wavelets (funciones) que son ortogonales a sus traducciones y escalado. Por lo tanto, descomponemos dicha señal en un número igual o menor del espectro del coeficiente Wavelet como lo es el número de puntos de datos de señal. Tal espectro Wavelet es muy bueno para el procesamiento y la compresión de la señal, por ejemplo, ya que aquí no obtenemos información redundante.

La transformada Wavelet continua, por el contrario, devuelve una matriz, una dimensión más grande que los datos de entrada. Para datos 1D obtenemos una imagen del plano de frecuencia de tiempo. Podemos ver fácilmente la evolución de las frecuencias de la señal durante la permanencia de la señal y comparar el espectro con otros espectros de señales. Como aquí se usa el conjunto de Wavelets no ortogonales, los datos están altamente correlacionados, por lo que se ve una gran redundancia. Esto ayuda a ver los resultados de manera más humana. (1)

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Bossio, G.R., De Angelo, C. H., De Pauli, A. D., García, G. O “El Método del valor alterno del módulo de la señal analítica” IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, pp. 240-241, jul. 2010.

Realiza dos grandes aportaciones como son:

- a. Simplifica el espectro en frecuencia. Ya que la señal analítica se basa en la transformada de Hilbert, y de esta forma los espectros, como por ejemplo el de la máquina con una barra rota o el de la máquina con excentricidad sólo poseen un componente debido a la armoniosa característica del fallo frente a las dos que presentan en la forma tradicional de Fourier simétricas con respecto a la frecuencia de alimentación. Este hecho es muy significativo desde el punto de vista del análisis de la señal, ya que, sí el espectro en

frecuencia está muy simplificado y nítido resultará más difícil no detectar las fallas o anomalías.

- b. Amplía los campos de aplicación de la técnica tradicional de Fourier al análisis de la corriente de una fase, como por ejemplo en el caso de la detección de la rotura de barras para bajos deslizamientos o inclusive cuando la máquina trabaja en vacío. Se hace evidente otra de las propiedades de la transformada de Hilbert, ya que elimina el efecto de dispersión. De esta forma se puede detectar la rotura de barras de una máquina eléctrica que trabaja en vacío hasta una que trabaja a plena carga.(2)

2.1.3. ANTECEDENTES REGIONALES

Jiménez Yenny, O. “Detección de problemas eléctricos en motores de C.A. y C.D. Por medio del análisis de vibraciones”. Mexico: Mantenimiento Predictivo Computarizado S.A. pág. 342 - 345 oct. 16, menciona: “Son datos nominales o características: La potencia, tensión, corriente, velocidad, frecuencia de C.A., rendimiento (performance), número de fases, factor de potencia y régimen de funcionamiento (para carga permanente, carga tipo sierra, carga de emergencia). Además, en la placa figura: Nombre del fabricante, año de fabricación, clase de aislamiento, también datos complementarios necesarios para la instalación y mantenimiento (peso, conexión trifásica, otros). El término “nominal” se puede usar también para referirse a magnitudes no señaladas en la placa, pero que corresponden al régimen nominal de funcionamiento, por ejemplo, par nominal, deslizamiento.”

Hidalgo J. Danny “Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos”; pág. 232 - 235 menciona: La falta de lubricación, la lubricación excesiva, la desalineación y las corrientes de los cojinetes (ejes) a menudo acortan drásticamente la vida útil de los cojinetes. Los culpables responsables de la falla prematura de los devanados del estator incluyen sobrecarga mecánica o térmica, ventilación deficiente y voltajes / uso transitorio en unidades de frecuencia variable (VFD). Afortunadamente para los gerentes de planta, la mayoría de las fallas prematuras de los motores se pueden prevenir utilizando soluciones sencillas para proteger los cojinetes y los devanados del estator.

Los rodamientos son pequeños en comparación con otros componentes principales del motor, lo que los hace particularmente vulnerables a daños y desgaste. No es de extrañar, entonces, que los estudios culpen a más de la mitad de todas las fallas de los motores en el mal funcionamiento del cojinete, la mayoría de los cuales se deben a una lubricación demasiado pequeña o excesiva. La clave para evitar estas condiciones es establecer un programa de lubricación utilizando las pautas del fabricante del cojinete y del motor para determinar la frecuencia y la cantidad de lubricación para la aplicación del motor, el servicio (continuo o intermitente), las condiciones ambientales y el tamaño del cojinete.

Otra causa importante de falla del rodamiento es la desalineación, cuyo efecto aumenta por el cubo del cambio. Por ejemplo, un valor de alineación que es el doble de la nueva tolerancia de instalación reducirá la vida útil del rodamiento en un factor de 8 (2^3). La solución es simple: alinear el motor y el equipo impulsado con nuevas o mejores tolerancias de instalación.

Las corrientes de los cojinetes generalmente son causadas por la disimetría en el bastidor del motor o al alimentar el motor desde un variador de frecuencia variable (VFD). Hace décadas, las corrientes de los cojinetes eran sólo un problema en motores muy grandes debido a su inherente falta de simetría magnética. El uso ubicuo de los VFD en la actualidad, tanto para nuevas instalaciones como para modernizaciones, somete a estos motores a una forma de onda de salida "cortada". La disimetría magnética resultante produce una trayectoria de corriente desde el marco del estator al eje y a través de los cojinetes en cada extremo.

Aunque todavía no existe una solución para las corrientes de los cojinetes, existen algunas medidas correctivas disponibles. Entre los más comunes de estos están los alojamientos de cojinetes aislados, los cojinetes de elementos rodantes de cerámica y los cepillos de puesta a tierra del eje. Otros métodos incluyen aislar el muñón del cojinete del eje, instalar cojinetes completamente cerámicos y usar grasa conductiva. La aplicación de filtros o reactores al VFD también ayuda a reducir la magnitud de la corriente del rodamiento. (3)

2.2. BASES TEÓRICAS

El análisis armónico de la corriente de un motor ha demostrado ser útil en el diagnóstico del estado de diferentes partes constitutivas de motores eléctricos. La aplicación del análisis de Hilbert es exclusiva para motores de inducción. La hipótesis fundamental de este análisis es que cada falla en un motor de inducción, aporta un componente único a la corriente de estator, luego, aplicando la transformada de Hilbert a dicha señal, se obtiene la envolvente de cada una de las componentes, lo que permite separar el componente fundamental (60 Hz). Luego de haber eliminado el componente fundamental, es relativamente sencillo establecer un monitoreo de alguna falla en el motor, o la evolución de una anomalía en éste, comparando el espectro de frecuencias mediante la transformada de Fourier a las envolventes con las frecuencias características de las fallas a estudiar.

2.2.1. LA TRANSFORMADA DE HILBERT

La transformada de Hilbert se define como la evolución de una función $s(t)$ dada de la siguiente forma:

$$\hat{s} = H\{s\}(t) = (h * s)(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

Donde:

$$h(t) = \frac{1}{\pi t}$$

Si a una función (t) se le aplica la transformada Hilbert, obteniendo $(t) = \mathcal{H}(x(t))$, se define la función analítica de (t) , (t) como sigue:

$$z(t) = x(t) + jy(t)$$

Función analítica de una señal asociada a la función de Hilbert

Donde la Función $z(t)$ tiene la propiedad de que todas las frecuencias negativas de $x(t)$ han sido filtradas.

La transformada de Hilbert, además tiene una respuesta en frecuencia dada por la transformada de Fourier:

$$H(w) = f\{h\}(w) = -j \cdot \text{sign}(w)$$

Transformada de Hilbert dada por la transformada de Fourier

En términos prácticos, esto quiere decir que si la función primitiva está compuesta por un componente de frecuencia positiva y otro componente de frecuencia negativa:

$$x(t) = x_+ + x_-(t) = e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}$$

Descomposición de una función en componentes

Se tiene que la transformada de Hilbert se obtiene agregando un desfase de 90° a las componentes de frecuencias negativas y agregando un desfase de 90° a los componentes de frecuencia positiva.

$$y_+(t) = e^{j\omega_0 t} * e^{-j\frac{\pi}{2}} = y_+(t) = -je^{-j\omega_0 t}$$

Componente positiva de una función sinusoidal

$$y_-(t) = e^{-j\omega_0 t} * e^{j\frac{\pi}{2}} = y_-(t) = je^{-j\omega_0 t}$$

Componente negativo de una función sinusoidal

Y ahora sumando ambas partes se obtiene la transformada de Hilbert de la función primitiva $x(t)$:

$$y(t) = -e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}$$

Transformada Hilbert de una función sinusoidal

Luego la función analítica queda:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t} + e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t}$$

Función analítica

$$z(t) = 2e^{j\omega_0 t}$$

Aplicando esta función, a una señal, se logra filtrar completamente los componentes negativos y los positivos han sido aumentados al doble.

Finalmente, la envolvente de una señal queda determinada por el módulo de la señal analítica de dicha señal. (2)

Es decir:

$$E(t) = |z(t)| = |x(t) + jy(t)|$$

Envolvente de una señal, aplicando transformada de Hilbert

Con $y(t)$ la transformada de Hilbert de la señal $x(t)$. (1)

2.2.2. ENVOLVENTE DE UNA SEÑAL PERIÓDICA

Suponiendo que se quiere analizar la corriente de estator de un motor que presenta fallas en el rotor. En primer lugar, siguiendo la metodología presentada, habría que calcular la envolvente de la señal asociada a la corriente. Este tipo de fallas está caracterizado por la frecuencia $2sf$, así que la señal queda denotada como sigue:

$$Im(t) = A\sin(\omega t) + B\sin[(\omega t + 2s\omega)t]$$

Luego, se plantea la señal original, para calcular su transformada de Hilbert y luego la Función Analítica;

$$x(t) = A\sin(\omega t) + B\sin[(\omega t + 2s\omega)t]$$

Y por lo tanto, con las propiedades indicadas, se obtiene que la transformada de Hilbert de esta señal es:

$$y(t) = -A\cos(\omega t) - B\cos[(\omega t + 2s\omega)t]$$

Luego, se calcula la señal analítica que queda expresada así:

$$z(t) = -je^{j\omega t}(A + e^{j2s\omega t})$$

Y sólo basta calcular el módulo de la señal analítica para conocer la envolvente;

$$E(t) = |A + e^{j2s\omega t}|$$

Este resultado entrega la siguiente información:

En primer lugar, la componente fundamental no tiene ningún tipo de interferencia. El componente que está presente corresponde a la frecuencia fundamental dos veces deslizada, que corresponde justamente a la frecuencia de la falla.

Se concluye que la envolvente de esta señal es la suma de la amplitud del componente fundamental, con el fasor B , que oscila a la frecuencia de falla.

2.2.3. INTERPRETACIÓN DE LOS ESPECTROS DE FRECUENCIA

El análisis clásico de Fourier permite, mediante la interpretación del espectro de frecuencias, asociar ciertos componentes a fallas en el equipo. Al aplicar este análisis a la envolvente de la señal, es necesario reformular las frecuencias de fallas, pues se ha producido un desplazamiento en ellas. Ahora, dado que el componente fundamental ha sido removido, la interpretación será más sencilla,

pues dependerá de menos variables, en particular de la frecuencia de la red. La variación de las frecuencias de acuerdo al análisis de la envolvente se muestra a continuación:

Los componentes de frecuencia para un motor sano:

Tabla 1. Componentes de frecuencia para motor con barras cortadas:

Análisis clásico de frecuencia	Análisis de la envolvente	Causa
F	0	Frecuencia de la red
$f(1 \pm 2s)$	$2sf$	Barra rota
$fr \pm f$	Fr	Ranurado de motor
$fr \pm f(1 \pm 2s)$	$fr \pm 2sf$	Ranurado de rotor y barra rota

Tabla 2. Componentes de frecuencias para un motor saturado y Excéntrico:

Análisis clásico de frecuencia	Análisis de la envolvente	Causa
F	0	Frecuencia de la red
$f \pm fmec$	$Fmec$	Excentricidad dinámica
$(2n + 1)f$ $1 \leq n \leq 2$	$2nf$	Saturación
$fr \pm f$	Fr	Ranurado de motor
$fr \pm fmec \pm f$	$fr \pm fmec$	Ranurado de rotor y excentricidad dinámica
$fr \pm (2n + 1)f$	$fr \pm 2nf$	Ranurado de rotor y Saturación

Tabla 3. Componentes de frecuencia para un motor con falla en rodamiento:

Análisis clásico de frecuencia	Análisis de la envolvente	Causa
F	0	Frecuencia de la red
$f \pm f_o$	Nfo	Falla en pista externa
$1 \leq n \leq 3$		
$f \pm f_i$	nfi	Falla en pista interna
$1 \leq n \leq 3$		

Tabla 4. Componentes de frecuencia para detección de corto circuito de espiras en flujo axial:

Análisis clásico de frecuencia	Análisis de la envolvente	Causa
F	0	Frecuencia de la red
$\left[\frac{k \pm n(1-s)}{p} \right] f$	$\left[\frac{n(1-s)}{p} \right] f$ Para k=1	Falla en bobinas del estator
$1 \leq n \leq (2p-1)$		
k = 1,3	$\left[\frac{k \pm n(1-s)}{p} \right] f$ Para k=3	

Donde:

$$f_r = f \frac{2}{p} (1-s) N_B$$

$$f_{mec} = f \frac{2}{p} = (1-s)$$

Con:

p : Número de polos

f : Frecuencia fundamental en Hz

NB : Número de barras

S : Deslizamiento

Además, hay que recordar que:

$$s = \frac{n_s - n_{mec}}{n_s}$$

Con:

n_s : Velocidad síncrona en rpm

n_{mec} : Velocidad del rotor en rpm (2)

2.2.4. FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE BAJA POTENCIA

2.2.4.1. REALIZACIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo se refiere a un cuidado regular y de rutina para ayudar a mantener el equipo en funcionamiento, evitando cualquier tiempo de inactividad no planificado y los altos costos de una falla imprevista del equipo. Requiere una planificación y programación cuidadosa del mantenimiento del equipo antes de que exista un problema real, así como el mantenimiento de registros precisos de las inspecciones anteriores y los informes de mantenimiento. La administración preventiva puede ser muy compleja, especialmente para las empresas con muchos equipos. Por esta razón, muchas empresas confían en el software de mantenimiento preventivo para ayudar a organizar y llevar a cabo todas sus necesidades de mantenimiento preventivo.

El mantenimiento preventivo implica la inspección sistemática del equipo donde se detectan y corrigen los posibles problemas para evitar que el equipo falle antes de que ocurra. En la práctica, un programa de mantenimiento preventivo puede incluir: limpieza, lubricación, cambios de aceite, ajustes, reparaciones, inspección y

reemplazo de piezas, y revisiones parciales o completas programadas regularmente.

El mantenimiento preventivo exacto requerido variará según la operación y el tipo de equipo. Los estándares recomendados del American National Standards Institute (ANSI) se utilizan para ayudar a determinar el tipo de inspecciones y el mantenimiento necesario y la frecuencia con la que se deben realizar. ANSI ayuda a garantizar la salud y seguridad de los consumidores al crear y supervisar el uso de miles de pautas y normas para casi todas las industrias. Las normas ANSI se pueden usar como una lista de verificación de mantenimiento preventivo para definir los requisitos e instrucciones para el mantenimiento del equipo.

El mantenimiento preventivo incluye mucho más que simplemente realizar el mantenimiento de rutina en el equipo. También implica mantener registros precisos de cada inspección y servicio, así como conocer la vida útil de cada parte para comprender la frecuencia de reemplazo. Estos registros pueden ayudar a los técnicos de mantenimiento a anticipar el momento adecuado para cambiar las piezas y también pueden ayudar a diagnosticar problemas cuando ocurren. El software de mantenimiento preventivo ayuda a recopilar y organizar esta información para que esté disponible para los técnicos de mantenimiento.

En el caso del mantenimiento, la organización e información debe estar encaminada a la permanente consecución de los siguientes objetivos:

- Optimización de la disponibilidad del equipo productivo.
- Disminución de los costos de mantenimiento.
- Optimización de los recursos humanos.
- Maximización de la vida útil de las máquinas.

2.2.4.2. APRENDIZAJE PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Pensar en todas las máquinas que se utilizará durante un año, todas, desde una tostadora todas las mañanas hasta un avión todas las vacaciones de verano. Ahora imagina que, de ahora en adelante, uno de ellos fallaría todos los días. ¿Qué impacto tendría? La verdad es que estamos rodeados de máquinas que nos facilitan la vida, pero también dependemos cada vez más de ellas. Por lo tanto, la calidad de una máquina no sólo se basa en lo útil y eficiente que es, sino también en lo confiable que es. Y junto con la fiabilidad viene el mantenimiento.

Cuando no se puede permitir el impacto de una falla, por ejemplo, un motor de avión que funciona mal, la máquina está sujeta a un mantenimiento preventivo, que implica una inspección y reparación periódicas, a menudo programadas en función del tiempo de servicio. El desafío de una programación adecuada crece con la complejidad de las máquinas: en un sistema con muchos componentes que trabajan juntos e influyen en la vida de cada uno, ¿cómo podemos encontrar el momento adecuado en el que se debe realizar el mantenimiento para que los componentes no se reemplacen prematuramente, pero todo el sistema aún sigue funcionando de forma fiable? Brindar una respuesta a esta pregunta es el objetivo del mantenimiento predictivo, donde buscamos construir modelos que cuantifiquen el riesgo de falla de una máquina en cualquier momento y usar esta información para mejorar la programación del mantenimiento.

El éxito de los modelos de mantenimiento predictivo depende de tres componentes principales: tener los datos correctos disponibles, estructurar el problema adecuadamente y evaluar, en esta tesis se tratarán los dos primeros puntos y daré una idea de cómo elegir la técnica de modelo que se adapte a la pregunta.

2.2.4.3. RECOPIACIÓN DE DATOS

Para construir un modelo de falla, requerimos suficientes datos históricos que nos permitan capturar información sobre los eventos que llevan a la falla. Además de eso, las características generales "estáticas" del sistema también pueden proporcionar información valiosa, como propiedades mecánicas, uso promedio y condiciones de operación. Sin embargo, muchos datos no siempre son mejor. Al recopilar datos para admitir un modelo de falla, es importante hacer un inventario de lo siguiente: ¿Cuáles son los tipos de fallas que pueden ocurrir? ¿Cuáles trataremos de predecir? ¿Cómo se ve el "proceso de falla"? ¿Es un proceso de degradación lento o agudo? ¿Qué partes de la máquina / sistema podrían estar relacionadas con cada tipo de falla? ¿Qué se puede medir sobre cada uno de ellos que refleja su estado? ¿Con qué frecuencia y con qué precisión deben realizarse estas mediciones?

La vida útil de las máquinas suele ser de acuerdo del orden de año de fabricación, lo que significa que los datos deben recopilarse durante un período prolongado de tiempo para observar el sistema en todo su proceso de degradación.

En un escenario ideal, tanto los científicos de datos como los expertos en dominios estarían involucrados en el plan de recopilación de datos para garantizar que los datos recopilados sean adecuados para el modelo que se construirá. Sin embargo,

lo que sucede sobre todo en la vida real es que los datos ya se han recopilado antes de que llegue el científico de datos y debe intentar sacar lo mejor de lo que está disponible.

Dependiendo de las características del sistema y de los datos disponibles, es esencial un marco adecuado del modelo a construir: ¿a qué pregunta queremos que responda el modelo y es posible con los datos que tenemos disponibles?

2.2.4.4. PROBLEMA EN EL MERCADO

Al pensar en cómo encuadrar un modelo de mantenimiento predictivo, es importante tener en mente un par de preguntas:

¿Qué tipo de salida debería dar el modelo? ¿Hay suficientes datos históricos disponibles o sólo datos estáticos? ¿Se etiquetan todos los eventos registrados, es decir, qué mediciones corresponden a un buen funcionamiento y cuáles corresponden a fallas? O al menos, ¿se sabe cuándo falló cada máquina (si es que lo hizo)? Cuando los eventos etiquetados están disponibles, ¿cuál es la proporción del número de eventos de cada tipo de falla y eventos de buen funcionamiento? ¿Con cuánta anticipación debe el modelo ser capaz de indicar que ocurrirá una falla? ¿Cuáles son los objetivos de rendimiento para los que se debe optimizar el modelo? ¿Alta precisión, alta sensibilidad / recuerdo, alta precisión? ¿Cuál es la consecuencia de no predecir una falla o predecir una falla que no ocurrirá?

Con toda esta información a la mano, ahora podemos decidir qué estrategia de modelado se ajusta mejor a los datos disponibles y al resultado deseado, o al menos cuál es el mejor candidato para comenzar. Existen múltiples estrategias de modelado para el mantenimiento predictivo y describiremos cuatro de ellas en relación con la pregunta que se pretenden responder y los tipos de datos que se requieren:

Modelos de regresión para predecir la vida útil restante (RUL)
Modelos de clasificación para predecir fallas dentro de una ventana de tiempo dada
Marcando comportamiento anómalo y Modelos de supervivencia para la predicción de probabilidad de fallo en el tiempo.

2.2.4.5. DIFERENTES TIPOS DE MOTORES

Si bien hay dos clasificaciones principales de motores, CA y CC, existen más de tres docenas de tipos de motores utilizados en aplicaciones industriales.

Hay muchos tipos de motores, hay una gran cantidad de superposición. Los seis tipos de motores más comunes, que se adaptan a la gran mayoría de las aplicaciones, son: motores sin escobillas y motores de escobillas, motores de jaula

de ardilla y rotor bobinado, y motores servo y motores paso a paso. En las aplicaciones industriales y el mercado ha presionado para simplificar la selección de motores. Esto, ha reducido las opciones prácticas para motores en la mayoría de las aplicaciones. Estos tipos de motores se adaptan a la gran mayoría de las aplicaciones con los otros tipos utilizados sólo en aplicaciones especializadas.

2.2.4.6. TIPOS DE CARGAS DE MOTOR

Hay cuatro tipos de cargas de motor de automatización industrial:

- Potencia variable y par constante.
- Torsión variable y potencia constante.
- Caballos de fuerza variable y par variable.
- Control posicional o control de par.

La potencia variable y las aplicaciones de par constante incluyen transportadores, grúas y bombas de engranajes. En estas aplicaciones, el par es constante porque la carga no cambia. La potencia requerida puede variar dependiendo de la aplicación, lo que hace que los motores de CA y CC de velocidad constante sean una buena opción.

Un ejemplo de un par variable y una aplicación de potencia constante es un papel de rebobinado de la máquina. La velocidad del material permanece constante, lo que significa que la potencia no cambia. Sin embargo, la carga cambia a medida que aumenta el diámetro del rollo. En sistemas pequeños, esta es una buena aplicación para motores de corriente continua o un servomotor. La potencia regenerativa también es una preocupación y debe considerarse al dimensionar el motor o al elegir el método de control de energía. Los motores de CA con codificadores, control de bucle cerrado y unidades de cuadrante completo pueden ser beneficiosos para sistemas más grandes.

Los ventiladores, bombas centrífugas y agitadores requieren caballos de fuerza y par variable. A medida que aumenta la velocidad del motor, la salida de carga también aumenta junto con la potencia y el par requeridos. Estos tipos de cargas son en gran parte del tema la discusión sobre la eficiencia del motor que comienza con los motores de CA que operan con el inversor y utilizan variadores de velocidad (VSD).

Las aplicaciones como los actuadores lineales, que deben moverse en múltiples posiciones con precisión, requieren un control de posición o par estrecho y, a

menudo, requieren retroalimentación para verificar la posición correcta del motor. Los motores servo o paso a paso son la mejor opción para estas aplicaciones, pero un motor de corriente continua con retroalimentación o un motor de corriente alterna inversor con un codificador a menudo se usa para el control de par apretado en líneas de acero o papel, así como aplicaciones similares.

2.2.4.7. TRES TIPOS PRINCIPALES DE APLICACIÓN

Las tres aplicaciones principales para motores son la velocidad constante, la velocidad variable y el control de posición (o par). Las diferentes situaciones de automatización industrial requieren diferentes aplicaciones y preguntas.

Por ejemplo, puede requerirse una caja de cambios si la velocidad máxima es menor que la velocidad base del motor. Esto también puede permitir que un motor más pequeño funcione a una velocidad más eficiente. Si bien hay una gran cantidad de información en línea sobre cómo dimensionar un motor, los usuarios deben tener en cuenta muchos factores porque hay muchos detalles que considerar. Para calcular la inercia de la carga, el par y la velocidad, el usuario debe conocer los parámetros, como la masa total y el tamaño (radio) de la carga, así como la fricción, las pérdidas de la caja de cambios y el ciclo de la máquina. Los cambios en la carga, la velocidad de aceleración o desaceleración, y el ciclo de trabajo de la aplicación también deben considerarse o el motor puede sobrecalentarse.

Después de seleccionar y dimensionar el tipo de motor, los usuarios también deben considerar los factores ambientales y los tipos de envolventes del motor, como el bastidor abierto y la carcasa de acero inoxidable para aplicaciones de lavado.

Incluso después de que se hayan tomado todas esas decisiones, el usuario debe abordar estas tres preguntas antes de tomar una decisión final.

¿Es una aplicación de velocidad constante?

En una aplicación de velocidad constante, un motor a menudo funciona a una velocidad aproximada con poca o ninguna preocupación acerca de las rampas de aceleración y desaceleración. Este tipo de aplicación generalmente se ejecuta utilizando el control de encendido / apagado a través de la línea. Los circuitos de control consisten en un circuito derivado que se fusiona con un contactor, un arrancador de motor de sobrecarga y un controlador de motor manual o arrancador suave.

Tanto los motores de CA como los de CC son adecuados para aplicaciones de velocidad constante. Los motores de CC proporcionan un par completo a velocidad cero y tienen una gran base instalada. Los motores de CA, también son una buena

opción porque tienen un alto factor de potencia y requieren poco mantenimiento. Las características de alto rendimiento de un servo o motor paso a paso, en comparación, se considerarían excesivas para una aplicación simple.

¿Es una aplicación de velocidad variable?

Las aplicaciones de velocidad variable generalmente requieren cambios ajustados de velocidad y, así como rampas de aceleración y deceleración definidas. La reducción de la velocidad del motor en la aplicación, como los ventiladores y las bombas centrífugas, a menudo mejora la eficiencia al hacer coincidir la potencia consumida con la carga en lugar de correr a toda velocidad y limitar o amortiguar la salida. Estas son consideraciones muy importantes para las aplicaciones de transporte, como las líneas de embotellado.

Los motores de CA y CC con las unidades apropiadas funcionan bien en aplicaciones de velocidad variable. Una configuración de motor y variador de CC fue la única opción de motor de velocidad variable durante mucho tiempo y los componentes están desarrollados y probados. Incluso ahora, los motores de corriente continua son populares en aplicaciones de velocidad variable, potencia fraccionada y son útiles en aplicaciones de baja velocidad, porque pueden proporcionar un par completo a baja velocidad y un par constante en una amplia gama de velocidades de motor.

Sin embargo, el mantenimiento puede ser una preocupación para los motores de corriente continua, porque muchos requieren cepillos para la conmutación y se desgastan al estar en contacto con las piezas móviles. Los motores de CC sin escobillas eliminan este problema, pero son más caros en costos iniciales y la gama de motores disponibles es menor.

El desgaste de los cepillos no es un problema con los motores de inducción de CA y un variador de frecuencia (VFD) crea una opción útil para aplicaciones de más de 1 hp, como las aplicaciones de ventilador y bombeo que conducen a una mayor eficiencia. El tipo de accionamiento elegido para ejecutar el motor puede agregar cierta conciencia de posición. Se puede agregar un codificador al motor si la aplicación lo requiere y se puede especificar un variador para usar la retroalimentación del codificador. Esta configuración puede proporcionar una velocidad de tipo servo como resultado.

¿Se requiere control de posición para la aplicación?

El control de posición firme se logra mediante la verificación continua de la posición del motor a medida que se mueve. Las aplicaciones como posicionar un actuador

lineal pueden usar un motor paso a paso con o sin retroalimentación o un servomotor con retroalimentación inherente.

Un paso a paso está diseñado para moverse con precisión a una posición a una velocidad moderada y luego mantener la posición. Un sistema paso a paso de bucle abierto ofrece un fuerte control de posición si se dimensiona correctamente. Si bien no hay retroalimentación, el paso a paso moverá el número exacto de pasos a menos que encuentre una interrupción de carga más allá de su capacidad. A medida que la velocidad y la dinámica de la aplicación aumentan, el control paso a paso de bucle abierto puede no ser capaz de cumplir los requisitos del sistema, lo que requiere una actualización a un paso a paso con retroalimentación o a un sistema de servomotor.

Un sistema de circuito cerrado proporciona perfiles de movimiento precisos y de alta velocidad y un control de posición preciso. Un sistema servo proporcionará un par más alto a altas velocidades en comparación con un paso a paso, y también funcionará mejor en aplicaciones de carga dinámica o de movimiento complejo.

Para movimientos de alto rendimiento con rebasamiento de posición baja, la inercia de carga reflejada debe coincidir con la inercia del servomotor lo más cerca posible. En algunas aplicaciones, el desajuste de hasta 10: 1 funcionará adecuadamente, pero una coincidencia de 1: 1 es óptima. La reducción de la velocidad de engranaje es una excelente manera de resolver los problemas de desajuste de inercia, ya que, la inercia de la carga reflejada cae por el cuadrado de la relación de engranaje, pero la inercia de la caja de engranajes debe incluirse en los cálculos.

Aplicación, conocimiento del motor

Los fabricantes ofrecen una amplia selección de motores para aplicaciones industriales. Los motores paso a paso, servo, CA y CC pueden satisfacer la mayoría de los requisitos de automatización industrial, pero el motor ideal depende de la aplicación. Ya sea una aplicación de velocidad constante, velocidad variable o control de posición, los usuarios deben trabajar estrechamente con el motor e impulsar al proveedor para seleccionar el motor adecuado para la aplicación. (3)

2.2.4.8. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción tienen dos componentes principales, el estator y el rotor. El estator lleva un devanado trifásico que recibe energía de la fuente. El devanado tiene la forma de un conjunto de conductores de la barra de posicionamiento justo en la superficie del rotor. Las ranuras tienen una abertura estrecha en la superficie del rotor, que sirve para bloquear las barras conductoras en su posición. Cada

extremo de cada conductor de barra está conectado a un anillo de cortocircuito, uno en cada extremo del rotor. El devanado del estado es un tipo convencional que se encuentra en los generadores trifásicos y motores síncronos.

El devanado trifásico del estator produce un campo giratorio de magnitud constante, que gira a la velocidad correspondiente a la frecuencia de la alimentación y el número de polos en el motor. Cuanto mayor sea el número de polos, menor será la velocidad de rotación. Cuando el rotor está parado y que el motor acaba de ser energizado, el flujo magnético producido por el estado pasa a través del rotor y al mismo tiempo corta los conductores del rotor a medida que gira. Como el flujo tiene una distribución sinusoidal en el espacio, su rotación hace que se vea una sinusoidal en los conductores del rotor. Por lo tanto, las corrientes fluyen en los conductores del rotor. Por los efectos de la inducción en el rotor por la acción del transformador, la máquina se denomina motor de "inducción". Dado que las corrientes ahora fluyen tanto en el estado como en el rotor, Los conductores del rotor establecerán los lugares que interactúan con el flujo de excitación del estado. Esta interacción hace que se desarrolle un par de torsión en el rotor. Si este es el resultado de la carga mecánica, el eje de girar y acelerar se da hasta que estos dos pares sean iguales. En consecuencia, la velocidad a la que el flujo del estado se reduce a los conductores del rotor se reduce a medida que aumenta la velocidad del eje.

Por lo tanto, la frecuencia y la magnitud de las fuerzas inducidas por el rotor disminuyen a medida que el eje acelera.

El flujo local ha sido producido por los conductores del rotor, por lo tanto, es más rápido que en la superficie del rotor. Sin embargo, como el cuerpo del rotor gira a una velocidad lenta, el efecto combinado de la velocidad del cuerpo es la velocidad de rotación del flujo del rotor local, esto hace que el flujo del rotor tenga la misma velocidad que el campo del estator.

Las corrientes del rotor están limitadas por la impedancia del cortocircuito del circuito del rotor. Este circuito contiene resistencia y reactancia. La reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia de las fuentes inducidas en el rotor. Ha medida que el rotor acelera se producen dos efectos:

- Aumenta la impedancia del rotor.
- El rotor de la fem se reduce.

Estos efectos provocan que la corriente de suministro sea casi constante durante la mayor parte del período de preparación.

La velocidad del rotor no puede alcanzar la misma velocidad que la del campo del estator, de lo contrario no habría fusiones y corrientes inducidas en el rotor, y no se desarrollaría un par de torsión. En consecuencia, cuando la velocidad del rotor está cerca de la velocidad síncrona, el par comienza a disminuir rápidamente hasta que coincide con el de la carga y la fricción rotacional y las pérdidas por viento. Cuando se logra este equilibrio, la velocidad se mantendrá constante.

2.2.4.9. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Se sabe que los motores de inducción (asíncronos) son superiores a sus contrapartes de CC en cuanto a robustez, confiabilidad, costo, tamaño y potencia de salida por peso. El aspecto principal que distingue al motor de inducción de los motores síncronos son que los motores de inducción son capaces de producir un par a cualquier velocidad por debajo de la velocidad síncrona. Estas máquinas se utilizan comúnmente en los sistemas de control de movimiento industrial y en los principales electrodomésticos con motor. Esto ha motivado el estudio del rendimiento del motor de inducción en varios accionamientos y, a menudo, se requiere conocer los valores precisos de los parámetros del motor para lograr sistemas de accionamiento de alto rendimiento. Como regla general, la conversión de la potencia eléctrica en potencia mecánica tiene lugar en la parte giratoria del motor eléctrico. Sin embargo, en los motores AC, el rotor no recibe energía eléctrica por conducción, sino por inducción exactamente de la misma manera que el secundario de un transformador de 2 bobinas recibe su energía del primario. Por eso, se llaman motores de inducción. De hecho, un motor de inducción puede ser tratado como un transformador rotativo, es decir, uno en cuyo devanado primario es estacionario, pero el secundario puede girar libremente. Debido a la creciente necesidad de máquinas asíncronas en el sector industrial, hay un énfasis creciente en una metodología de análisis y modelado aceptable y adecuado de estas máquinas para todos los modos de operación. Los problemas relacionados con la estabilidad de los sistemas de potencia, las técnicas de simulación asistidas por computadora se utilizan comúnmente.

2.2.5. ESTIMACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Los parámetros del motor de inducción generalmente se obtienen a partir de datos de prueba de carga plena, sin carga y de rotor bloqueado durante la prueba de puesta en servicio según la norma IEEE 112.

Sin embargo, los parámetros del motor de inducción varían con la temperatura, la saturación y la frecuencia. La falta de coincidencia entre los valores de los parámetros del motor en el controlador del mismo y los valores reales de los parámetros del motor dan como resultado deterioros en el rendimiento del variador, lo que eventualmente lleva a un funcionamiento inestable del sistema. Los parámetros fundamentales equivalentes del circuito del motor de inducción son la resistencia del estator / rotor, la inductancia de fuga del estator / rotor, la inductancia transitoria del estator y la inductancia de magnetización nominal. El factor de potencia de operación es también uno de los parámetros críticos para las funciones de control y protección del motor. Dado que el factor de potencia se puede obtener en base a estos parámetros de circuito equivalentes, esta tesis se enfoca en la estimación de parámetros de circuito equivalentes. Los métodos de estimación de los parámetros de motores, generalmente, se pueden clasificar en dos grupos, el método de identificación fuera de línea y los métodos de identificación en línea.

Según el esquema de control, los parámetros requeridos del motor son algunos de los siguientes: La identificación de los parámetros del motor fuera de línea se realizan normalmente durante la sesión de puesta en servicio. En algunos métodos, el motor se mantiene parado con una alimentación monofásica. La resistencia del estator, generalmente se determina aplicando voltaje de CC, es decir, la resistencia se calcula por la relación de voltaje a corriente. Los parámetros restantes se identifican mediante la respuesta transitoria cuando se aplica el pulso de voltaje de CC. Para mejorar la precisión, se emplean señales de excitación especiales, observadores adaptativos y complicados métodos de procesamiento matemático. Se ha investigado poco sobre la excitación del voltaje de CA, ya que el voltaje de prueba y las señales de corriente deben diseñarse cuidadosamente. En otros métodos, los parámetros del motor se estiman mientras el rotor gira. Los testes de rotor estándar, sin carga se utilizan en los experimentos de laboratorio.

En la estimación de los parámetros del motor en línea, los parámetros del motor se actualizan continuamente a los algoritmos de control sin sensor. Hay tres tipos principales de técnicas de identificación de parámetros de motor en línea.

- Técnicas de análisis espectral: Estos tipos de técnicas se basan en el análisis de componentes de frecuencia característicos en el espectro de voltaje /

corriente. Los componentes de frecuencia suelen ser la respuesta consecuente a señales de prueba inyectadas deliberadamente, como componentes de secuencia negativa, señal de secuencia binaria pseudo aleatoria y perturbación sinusoidal. Dado que estos tipos de técnicas no pueden aplicarse en condiciones normales de funcionamiento, apenas se han utilizado en la práctica.

- Técnicas basadas en el observador: Son capaces de estimar parámetros durante las condiciones de operaciones normales. Entre las diversas técnicas propuestas, el Filtro de Kalman Extendido (EKF) y el observador adaptativo son de particular interés. El método EKF puede lograr una estimación de alta precisión en condiciones ruidosas a costa de un cálculo pesado.
- Técnica basada en el Sistema Adaptable de Referencia (MRAS): El enfoque MRAS ha atraído un considerable interés de investigación debido a su bajo costo y simplicidad de implementación. Es un enfoque genérico basado en un principio de control adaptativo de referencia de modelo. El núcleo de este método es optimizar los parámetros del modelo para que las salidas del modelo coincidan con las salidas medidas. Por lo tanto, la precisión depende en gran medida de la precisión del modelo aplicado y del método de optimización seleccionado. Los algoritmos de optimización local pueden converger a mínimos locales o incluso divergir cuando los valores iniciales de los parámetros están muy lejos de sus valores reales. Por consiguiente, los algoritmos de optimización global son altamente preferidos en el enfoque basado en MRAS.

2.2.5.1. FALLAS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO

Dependiendo de la región de ocurrencia de las fallas del motor de inducción, generalmente, se clasifican en cuatro categorías: Fallas del rodamiento, fallas del rotor, fallas del estator y fallas de excentricidad. El trabajo inicial sobre el diagnóstico de fallas de motores de inducción se remonta a 1970 s y 1980 s, desde 1990, se han visto la rápida evolución en este tema. El ritmo para buscar soluciones de diagnóstico de fallas precisas y rentables aún continúan debido a las limitaciones de los métodos de la técnica, anteriores y al nuevo cambio introducido por los complejos sistemas de control de motores, en los que se suprimen algunas firmas relacionadas con fallas. Varios artículos se han dedicado a abordar los métodos de diagnóstico de fallas y monitoreo de la condición del motor de inducción. En las

siguientes subsecciones se estudian los métodos de diagnóstico de fallas relacionadas con el rodamiento, el rotor y la excentricidad. Luego, se discuten detalladamente los métodos para las fallas relacionadas con el estator, que son los más relevantes para el trabajo de investigación presentado en esta tesis.

2.2.5.2. FALLAS DE RODAMIENTO

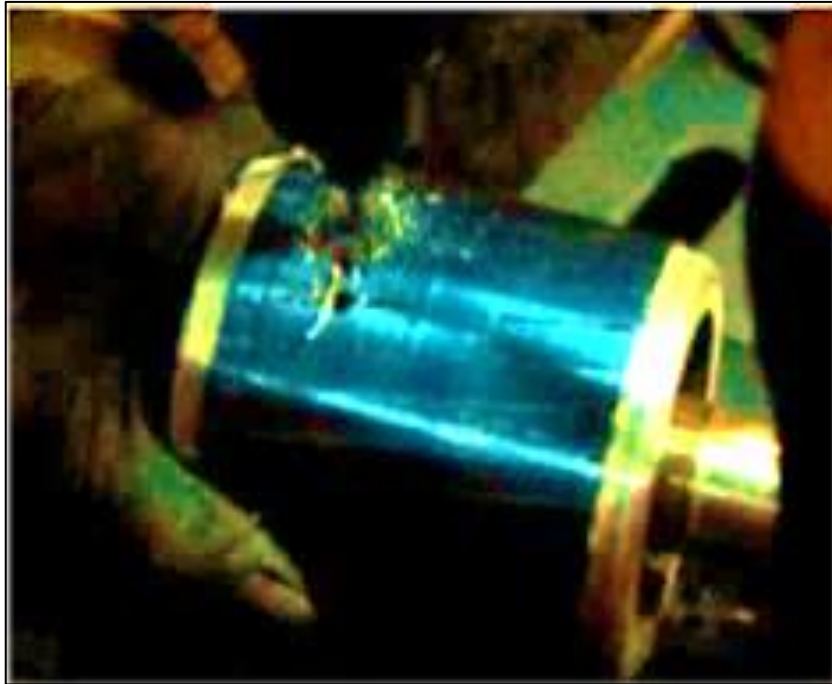
El rodamiento consiste en un anillo interior y otro exterior, donde se colocan un juego de bolas o elementos rodantes dentro de las pistas de rodadura. Los rodamientos se pueden estropear por fallas internas, como saltos, picaduras y grietas en las superficies de rodadura o por causas externas que incluyen contaminación, corrosión, lubricación inadecuada, desalineación y operación de sobrecarga. Casi el 40-50% de todas las fallas de los motores están relacionados con el rodamiento. Estos fallos pueden aumentar los niveles de vibración y ruido. Entre las diversas señales relacionadas con fallas de los rodamientos (por ejemplo, vibración, corriente, emisión acústica, presión de sonido), la vibración es la señal más ampliamente utilizada para diagnosticar las fallas. En algunos casos, cuando las vibraciones mecánicas no son fáciles de detectar (por ejemplo, en ambientes hostiles), la corriente es más preferible como método de diagnóstico no intrusivo. Sin embargo, el mecanismo físico que vincula la vibración y la corriente del motor aún no está claro. Se cree que los efectos de vibración en la corriente del motor están relacionados con las variaciones del espacio de aire, lo que implica una correlación con las fallas de desplazamiento. El estudio pretende comparar el rendimiento de los métodos basados en la vibración y los métodos actuales. Se concluye que el diagnóstico de fallas en los rodamientos utilizando el análisis de señal actual es efectivo sólo para fallas de baja frecuencia, mientras que la vibración es un indicador robusto para todas las condiciones analizadas, tanto la vibración como la corriente se han utilizado para proporcionar una indicación mejorada de las fallas de los rodamientos.

2.2.5.3. FALLAS RELACIONADAS CON EL ROTOR

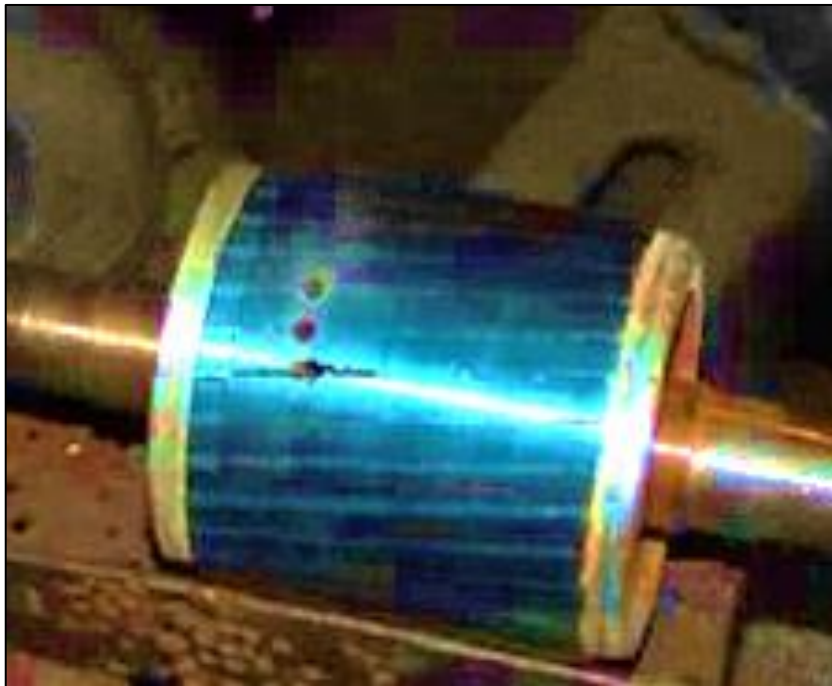
Las fallas incluyen barras rotas del rotor y fallas en el extremo del anillo. Las fallas representan alrededor del 5-10% de las fallas totales del motor de inducción. Las fallas pueden ser causadas por tensiones térmicas, magnéticas, residuales y/o dinámicas excesivas; corrosión debido a químicos o humedad; esfuerzo mecánico debido a laminaciones sueltas y parte fatigada.

Las fallas dan como resultado una oscilación de la velocidad y componentes frecuentes anormales en el espectro actual. Cuando se produce una barra del rotor rota o un anillo final, la corriente no puede fluir a través de la barra del rotor rota, lo que produce un flujo del rotor desequilibrado. Este desequilibrio es una combinación de flujo de rotor de secuencia positiva y negativa que gira a una frecuencia de deslizamiento en la dirección opuesta. En consecuencia, las fallas dan lugar a una secuencia de los componentes de banda lateral $f_b = (1 \pm 2ks) f$ alrededor del componente de frecuencia fundamental f , donde $k = 1, 2, 3, \dots$. Los armónicos se pueden utilizar como un indicador de ruptura fallas de la barra del rotor.

El problema de utilizar los componentes de frecuencia de banda lateral como indicador de fallas desencadena la falta de potencia y una fuente de alimentación no ideal (por ejemplo, tensiones armónicas y desequilibrio de tensión) también podría inducir la misma frecuencia armónica, que no se puede diferenciar de la causada por la barra rota del rotor. Por lo tanto, se han aplicado diferentes técnicas de procesamiento de señales para extraer información útil del espectro actual, como instantes de cruce cero de corriente de motor, envolvente de corriente de estator, análisis discriminante múltiple, descomposición de Wavelet, clasificación de señales y estimación de parámetros de señal mediante técnicas de invariancia rotacional.



(a)



(b)

**Figura 1(a) (b), la falla del rotor (barra del rotor rota) se
Induce agujeros en el rotor**

Aparte de los métodos basados en la corriente, otros métodos de diagnóstico, pueden ser: métodos de obturación, propulsados como la potencia instantánea, el campo magnético externo y el par de la brecha de aire. Con el fin de eliminar los efectos de la fuente de alimentación no ideal y las oscilaciones de carga, el método de prueba de terminal abierta se demuestra cuando se eliminan los tres voltajes del estator, las corrientes del estator se reducen rápidamente a cero y las corrientes del rotor inducen voltajes en los devanados del estator. Por lo tanto, las fallas de barras rotas se pueden diagnosticar al monitorear componentes de frecuencia armónica en el espectro, se introduce un método de diagnóstico basado en modelos para motores de inducción controlados en lazo cerrado. El concepto se basa en la medición de las oscilaciones a una frecuencia de $2s f$ presentada en el componente del eje d del flujo estimado del rotor. Luego, se reconstruye un componente de corriente de magnetización virtual asociado con la falla, que permite la detección y cuantificación de la extensión de las fallas del rotor en el motor. Establece una clara relación matemática entre el factor de severidad obtenido y el número de barras rotas del rotor. Se afirma que el método propuesto es independiente del nivel de carga, la velocidad y el ancho de banda del bucle de control de los motores. Sin embargo, requiere un modelo matemático preciso de todo el sistema de conducción, incluidos los parámetros del bucle de control, que pueden no estar disponibles o cuyos parámetros varían con el tiempo debido al envejecimiento o al cambio de las condiciones de operación. El último estudio muestra que los conductos de los ejes pueden producir componentes de frecuencia idénticos a los componentes de frecuencia de barra de rotor rotos de $(1 \pm 2s) f$. En consecuencia, el transitorio de inicio se utiliza para resolver este desafío en este estudio.

Las sensibilidades de diferentes señales de diagnóstico comparan algunos autores. Se ha encontrado que aunque la corriente del estator se usa popularmente para el diagnóstico de barras rotas, tiene la sensibilidad más alta entre la potencia parcial, el par y la potencia total. La potencia parcial referida al componente DC tiene el mejor rendimiento en términos de sensibilidad. Las potencias instantáneas, tanto totales como parciales, parecen ser más adecuadas para el diagnóstico de anomalías del rotor que la corriente del estator. (4)

2.2.5.4. FALLAS RELACIONADAS CON LA EXCENRICIDAD

La excentricidad de la máquina es la condición de que exista un espacio de aire desigual entre el estator y el rotor. Las fallas de excentricidad pueden ser los tipos de excentricidad de espacio de aire estático, excentricidad de espacio de aire dinámico o mezcla de ambas formas, llamada excentricidad mixta. La excentricidad estática generalmente se debe al núcleo del estator o al posicionamiento incorrecto del rotor o del estator durante el proceso de fabricación, por lo tanto, puede existir en nuevos motores de inducción. Aunque el 10% es el nivel máximo de excentricidad permisible para la mayoría de las plantas industriales, los fabricantes de motores puedan hacer un esfuerzo sustancial para reducir el nivel de excentricidad con el fin de minimizar la vibración, el ruido y el tirón magnético desequilibrado. La excentricidad dinámica depende del espacio y el tiempo debido al eje doblado, al desgaste de los rodamientos, a la desalineación, a la resonancia mecánica a una velocidad crítica, etc. La gran excentricidad produce fuerzas radiales desequilibradas y, de esta manera, conduce al roce del estator al rotor, lo que causa un daño grave en el estator y rotor.

Las señales de vibración y corriente generalmente se seleccionaron para diagnosticar la presencia de excentricidad ya que las variaciones de excentricidad conducen a patrones de firma únicos en vibraciones y espectros actuales. Pocos resultados de investigaciones se basan en señales de vibraciones, porque los transductores de vibración son delicados, caros y difíciles de instalar. Además, la variación de la velocidad y la carga mecánica del motor podría dar lugar a la variación y a una falsa alarma. Por el contrario, los transformadores de corriente pueden instalarse fácilmente en un entorno industrial para adquirir señales de corriente sin componentes invasivos. De esta manera, la mayoría de los métodos de diagnóstico de excentricidad se basan en el análisis espectral de la corriente.

Los componentes de frecuencia relacionados con la excentricidad estática y dinámica en el espectro de corrientes del estator del motor son:

$$f_e = |f \pm kf_r|, \quad k=1,2,3,4,5,\dots$$

Donde f_r es la frecuencia de rotación del rotor.

La limitación del análisis de espectro actual es que no todos los motores de inducción de tres fases tienen los armónicos destacados en el espectro de corriente del estator. La presencia de estos armónicos depende del número de ranuras del rotor y del número de pares de polos fundamentales. Además, algunos de estos

armónicos pueden aparecer en una máquina en buen estado debido a la fuente de alimentación y los desequilibrios de construcción. Además, los sistemas de control de motores ampliamente utilizados pueden suprimir algunos tipos de fallas. Para mejorar la precisión del diagnóstico, el método de diagnóstico basado en redes neuronales se entrena y se prueba con los datos recopilados de un motor de inducción conectado a un circuito cerrado. Entonces, la red capacitada puede diagnosticar la condición del motor estimando un umbral correspondiente a una condición de operación. Algunos autores muestran que los armónicos de la potencia instantánea también pueden utilizarse para diagnosticar la presencia de excentricidad, ya que, la potencia instantánea es el producto de una acción instantánea de la tensión de línea y corriente de línea. Se propone un enfoque de prueba integrado en el inversor para el monitoreo de la excentricidad del flujo. Cuando el motor está parado, el inversor inyecta un pequeño campo de CA pulsante superpuesto en niveles variables del campo de CC.

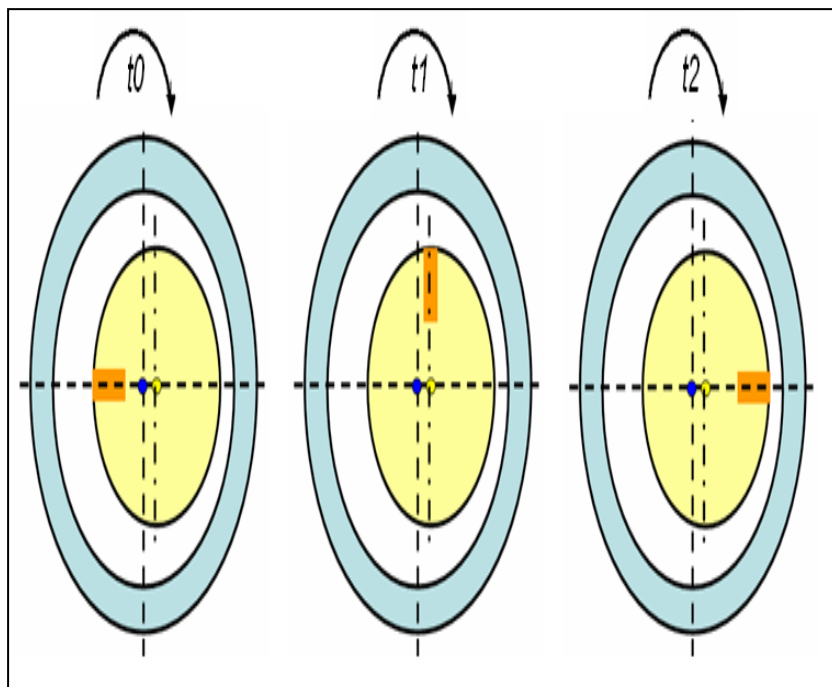


Figura 2. Excentricidad estática: generado por (a) Estator Ovalado (b) Incorrecto posicionamiento del rotor.

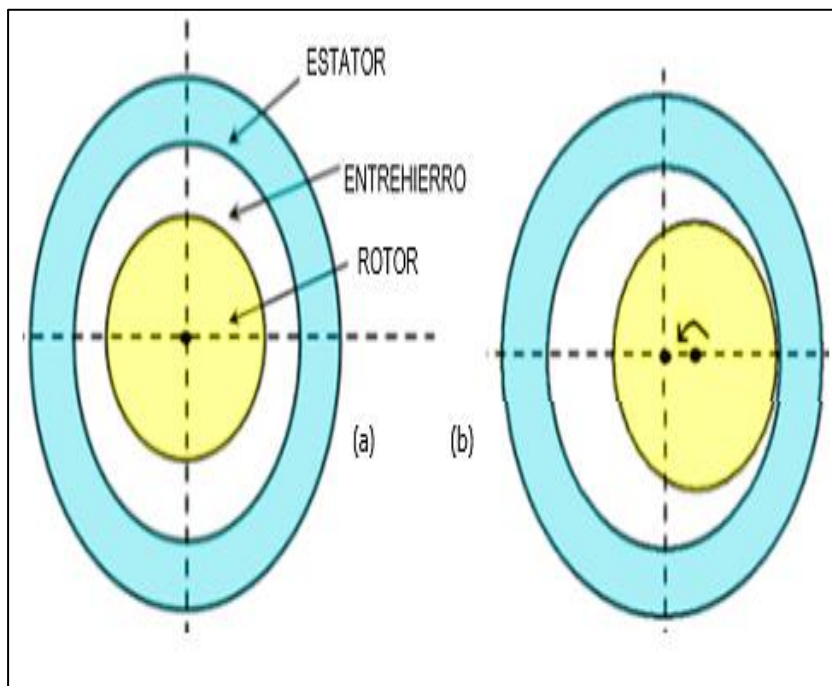


Figura 3. Trazo descrito por una máquina eléctrica rotativa con excentricidad estática.

La inductancia diferencial equivalente medida se puede usar como un indicador para detectar el presente de la excentricidad. El método propuesto puede integrarse con el inversor sin hardware, software ni costos de cómputo adicionales. Dado que el método diagnostica la falla en la parada del motor, no puede utilizarse como monitoreo de condición en línea.

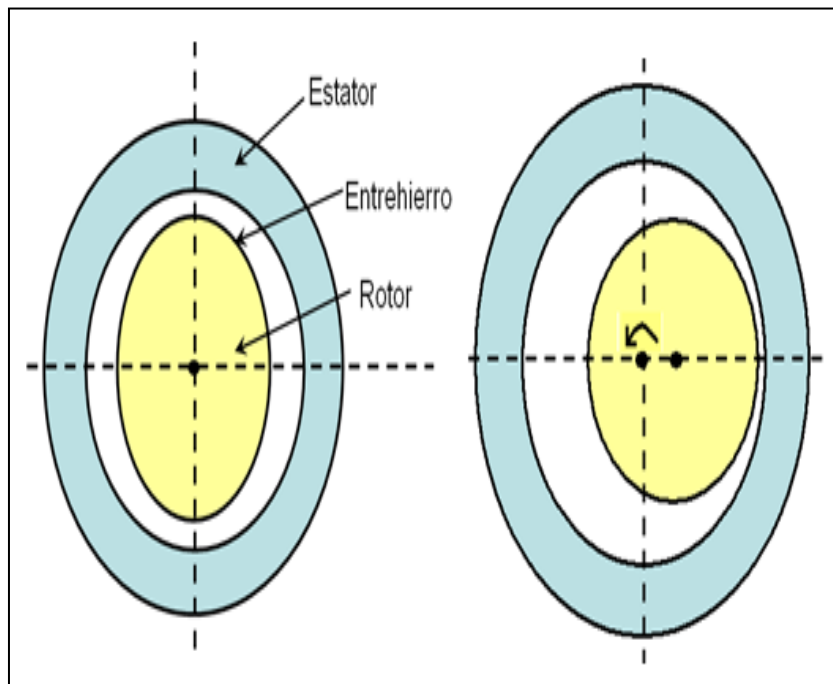


Figura 4. Excentricidad dinámica generada por: rotor ligeramente ovalado (b) eje de giro del rotor no coincide con su centro de masas.

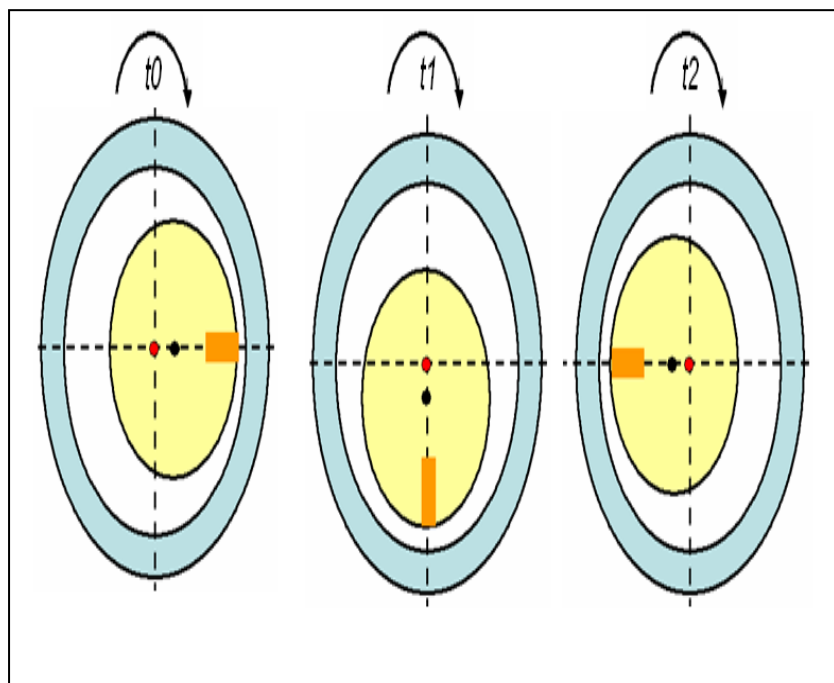


Figura 5. Trazo descrito por una máquina eléctrica rotativa con excentricidad dinámica.

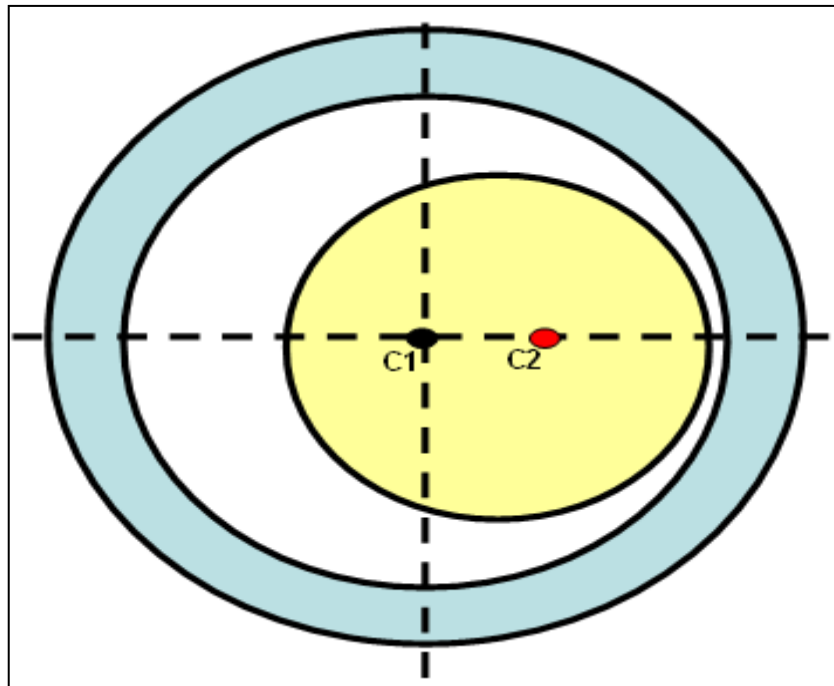


Figura 6. Trazo en la misma figura de dos excentricidades, estática con eje de giro en $C2$, y dinámica con eje de giro $C1$.

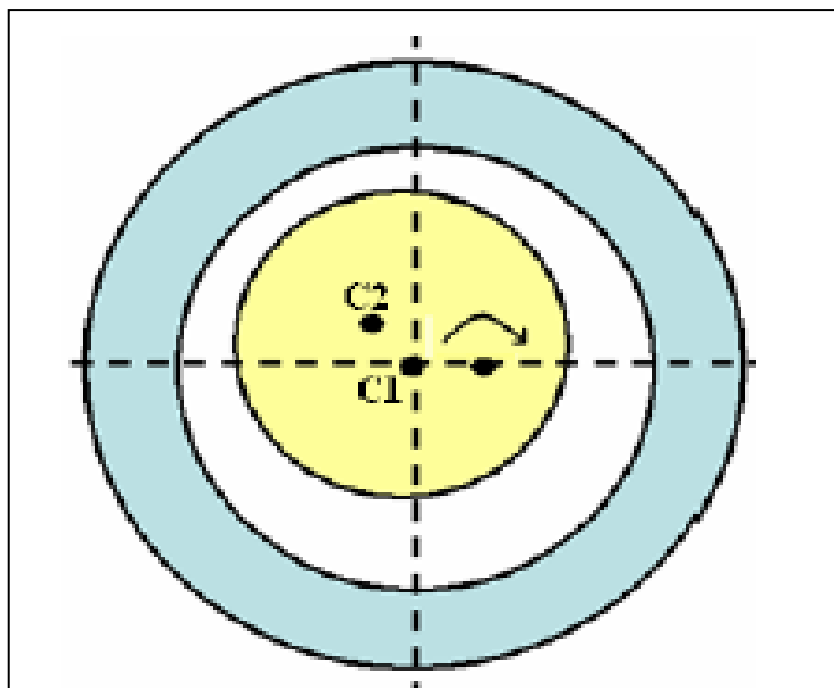


Figura 7. Excentricidad mixta.

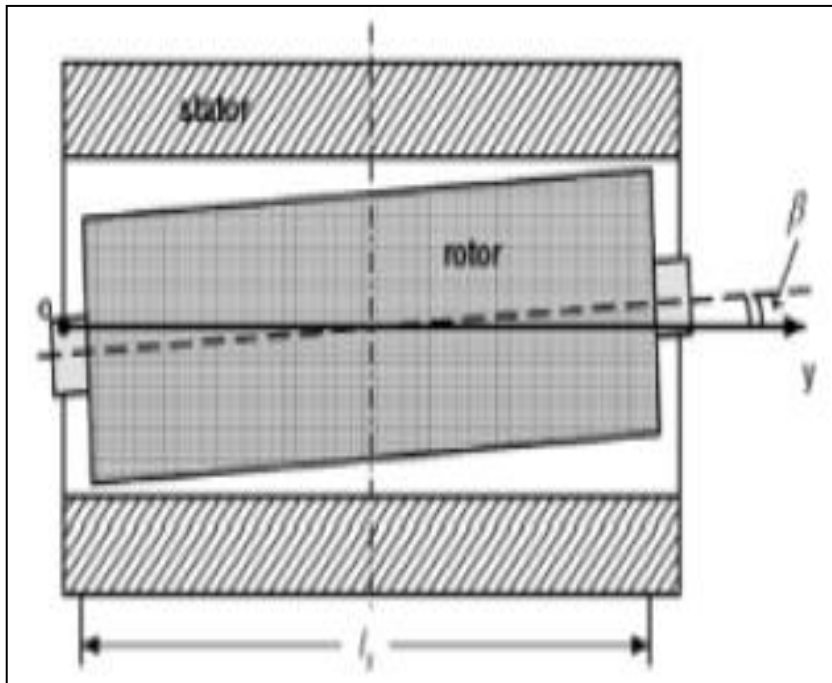


Figura 8. Excentricidad axial. (5)

2.2.5.5. FALLAS RELACIONADAS CON EL ESTATOR

Las fallas relacionadas con el estator son en su mayoría responsables del 30-40% de todas las fallas del motor de inducción reportadas. Las fallas generalmente son el resultado de la degradación del sistema de aislamiento del estator, principalmente debido a la alta temperatura en el núcleo o bobinado del estator; soporte suelto para el devanado final, laminación de núcleo flojo, cuñas de ranura y juntas; cortocircuito o tensiones de arranque; contaminación por aceite, humedad y suciedad; descargas eléctricas; fugas en sistemas de refrigeración, etc. Una de las etapas de falla incipiente dominante es el cortocircuito entre los devanados. El calor local en estos devanados cortocircuitados se expandirá a los devanados adyacentes y al núcleo del estator, lo que provocará una falla en el aislamiento del núcleo del estator. La propagación de este proceso suele ser de 1 a 2 segundos, desde el cortocircuito de vuelta a vuelta hasta las fallas de fase a tierra o de fase a fase cuando se alcanza la temperatura de ruptura del aislamiento. Por lo tanto, la detección confiable de la falla de cortocircuito entre vueltas en una etapa temprana eliminaría el daño subsiguiente a los devanados y núcleos adyacentes del estator.

Se han realizado intensos esfuerzos de investigación para diagnosticar fallas de cortocircuitos del estator. Los métodos de diagnóstico pueden clasificarse ampliamente en tres categorías: análisis de firmas de fallas en señales grabadas, técnicas basadas en modelos y técnicas de inteligencia artificial (AI).

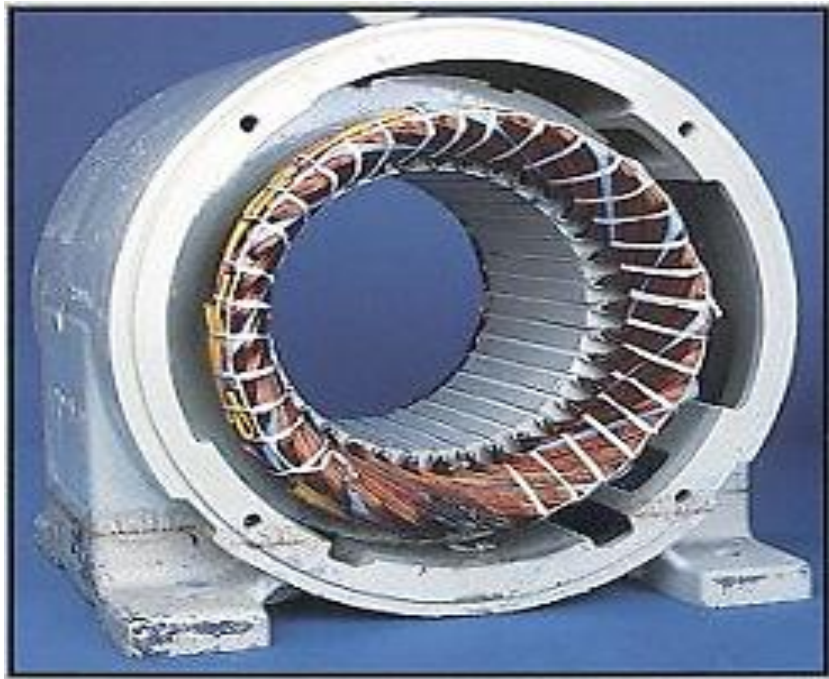


Figura 9. Fallas en el aislamiento típicamente debido a vibraciones, sobre voltajes, abrasivos, contaminación por ambientes hostiles.

En la primera clase, el monitoreo de condición se logra identificando las variaciones de parámetros relacionados con fallas de las señales grabadas en el dominio del tiempo y/o la frecuencia. Las características extraídas de las señales grabadas se emplean para diagnosticar fallas. Por ejemplo, las fallas de cortocircuito del estator resultan en la asimetría de la impedancia de la máquina. La impedancia asimétrica conduce a corrientes de fase desequilibradas, que causan corrientes de secuencia negativas. Estas corrientes de secuencia negativa pueden usarse como un indicador de las fallas relacionadas con el estator.

Aparte del bajo costo y la simplicidad técnica, este tipo de métodos no requiere acceso físico al motor porque la corriente se puede medir desde el tablero de distribución. Sin embargo, estos métodos solo son aplicables a máquinas rotativas simétricas en condiciones de alimentación constante. Los componentes de frecuencia destacados del espectro de corriente del estator utilizados para la detección de cortocircuito del estator también podrían ser causados por la asimetría intrínseca de los motores, el desequilibrio de la fuente de alimentación, la saturación de la máquina, etc., que es el inconveniente común de los métodos basados en firmas de fallas. Para mejorar la precisión de la detección de fallas, se han empleado

técnicas avanzadas de procesamiento de señales, como la transformada Wavelet, el vector de Park extendido, la teoría de múltiples marcos de referencia y la envolvente de corriente del estator.

La segunda clase se basa en modelos matemáticos de máquina que incluyen modelos de fallas. Habilitados por computadoras potentes, se han propuesto varios enfoques para modelar el comportamiento del motor de inducción en condiciones de falla. El enfoque de la función de devanado proporciona una comprensión profunda de los componentes de frecuencia en fallas de cortocircuito entre vueltas. Sin embargo, debido a su complejidad, no es atractivo en aplicaciones industriales prácticas. Otros esquemas se basan en modelos matemáticos integrales del motor de inducción y parámetros característicos de fallas. Estos esquemas requieren la especificación de los parámetros fundamentales del motor y los valores iniciales de los parámetros que caracterizan la condición de la máquina. El voltaje del estator medido se utiliza como entrada del modelo de motor de inducción para producir la corriente del estator como salida. El valor cuadrado del residuo entre la salida del modelo y la corriente del estator medida se define como la función objetivo. Si el valor de la función objetivo es mayor que un umbral específico, se estimará un nuevo conjunto de parámetros característicos para reducir este valor. La salida del nuevo modelo se producirá en función del nuevo conjunto de parámetros. El proceso se reitera hasta que la función objetivo cae por debajo del umbral. La condición del motor se puede determinar de acuerdo con estos parámetros característicos. Dado que un modelo de motor de inducción es altamente no lineal, el algoritmo de búsqueda local podría quedar atrapado en los mínimos locales. Por lo consiguiente el resultado de la estimación de parámetros del algoritmo de búsqueda local depende en gran medida del punto de partida. En contraste, los algoritmos de optimización global son menos sensibles a un punto de partida. El resultado estimado se acerca al mínimo global a costa de un tiempo de cómputo ligeramente mayor. Una elección alternativa de la estimación de parámetros directos es una estrategia de detección e identificación de fallas del estator basada en la generación de un residuo mediante el uso de un observador de estado. En este método, el componente de secuencia negativa del error de estimación actual se utiliza como un detector de fallas para disminuir la sensibilidad del cambio de parámetro.

La tercera clase se basa en las técnicas de inteligencia artificial (IA). Las técnicas de IA son de gran importancia práctica y se han utilizado para resolver problemas

complejos en ingeniería y ciencia. En los esquemas de monitoreo de motores de inducción basados en IA, las corrientes y tensiones del estator son usualmente las entradas preferidas debido a la adquisición de señales no invasivas y la eliminación de sensores costosos. Se han llevado a cabo investigaciones sustanciales sobre el uso de técnicas basadas en IA, incluidas redes neuronales, sistemas expertos, sistemas difusos y algoritmos genéticos (GA). El procedimiento de diagnóstico basado en AI se puede dividir en tres pasos: seleccionando las fallas específicas, definiendo las relaciones de efecto de causa y calculando los índices de diagnóstico vinculados a la falla. En comparación con los enfoques basados en el análisis de firmas, los métodos basados en AI son robustos para la asimetría intrínseca del motor y el desequilibrio de la fuente de alimentación a expensas de una carga de cómputo significativamente mayor. Además, los datos de entrenamientos, generalmente requiere de un conjunto de datos de operación existentes para mejorar la precisión de los resultados de diagnóstico. Con el avance en la capacidad de cálculo y la reducción de costos de los procesadores de señales digitales. Las técnicas basadas en IA son todavía muy prometedoras en el diagnóstico futuro de los motores de inducción.

2.2.5.6. FALLAS EXTERNAS

Engloba las fallas que se producen por una causa externa a la máquina eléctrica rotativa, como pueden ser las fallas en la alimentación de la máquina, variaciones en la carga de la máquina, etc.

2.2.5.6.1. DEBIDO A QUE COMPONENTES ELECTRICOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACION O REGULACION DE LA MAQUINA ELECTRICA

En muchas aplicaciones industriales las máquinas eléctricas de inducción se encuentran alimentadas a través de sistemas electrónicos encargados de su regulación. Estos sistemas comúnmente utilizados para realizar los arranques en las máquinas eléctricas y solventar el aumento de la corriente para controlar la frenada, regular diferentes velocidades, etc.

Consecuentemente, estos sistemas externos pueden inducir fallas a la máquina eléctrica y deberán ser tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio de diagnóstico y detección de fallas de la máquina eléctrica.

2.2.5.6.2. EFECTOS DE CARGA

Si el Par de la carga varía con la posición del rotor, la corriente debe contener componentes espectrales, las cuales, deben coincidir con este efecto. En una máquina eléctrica ideal donde los enlaces de flujo del estator son puramente senoidales, cualquier oscilación que se produzca en el par de la carga y a la velocidad de giro del rotor $m \cdot f_r$ producirá unos componentes espectrales en la corriente del estator que responden a la siguiente ecuación:

$$f_{carga} = f_s \pm m \cdot f_r = f_s \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right]$$

Donde $m = 1, 2, 3$, siendo habitual que en sistemas donde el par de la carga varía en el tiempo, estas frecuencias enmascaren otros tipos de fallas, resultando difícil discernir si la frecuencia característica es debida a un posible fallo, excentricidad o rotura de barras, o es una variación de la carga. No obstante, existen estudios en los cuales es posible detectar la rotura de barras aun cuando existen armónicos inducidos por la variación, de la carga de la máquina eléctrica.

2.2.5.6.3. FALLAS MECÁNICAS

En este apartado se pretende dar una visión general de las fallas mecánicas más comunes de las máquinas eléctricas rotativas, resumiendo su origen, causas y formas de detección. Las fallas mecánicas, casi todos se producen en el rotor, ya que es la parte móvil, y se identifican como desequilibrios, desalineamientos, fallas en los cojinetes, fallas en los engranajes y excentricidades en todas sus variantes.

2.2.5.6.4. DESEQUILIBRIO

Un sistema mecánico giratorio está en equilibrio si la resultante de todas las fuerzas, tanto internas como externas y sus respectivos pares son de magnitud, dirección y sentido constante.

Una vez fijada la constancia en módulo, sentido y dirección de las fuerzas, gracias a una distribución homogénea de las masas, se sujeta a la máquina mediante anclajes que opongan una fuerza a la resultante del sistema. Debido a esta definición se pueden observar dos tipos de desequilibrios:

Estático, producido por una distribución no homogénea de masa, detectable con el rotor parado. Si un rotor posee un desequilibrio estático, al apoyar sus dos extremos sobre los cojinetes se desplazará hasta quedar la parte más pesada en la posición más baja.

Dinámico, asociado al propio movimiento. Si un rotor posee una distribución longitudinal de pesos incorrecta se produce la intersección de los ejes de rotación y la de inercia en un solo punto. (6)

2.2.5.6.5. DESALINEACIÓN

Una alineación correcta de un motor industrial puede aumentar la vida útil de la maquinaria giratoria y garantizar una transferencia de energía suave y eficiente del motor al equipo accionado. Una desalineación causará fractura del eje, fallas en los rodamientos y vibraciones debido al aumento de la tensión. Estas fallas provocarán averías en la planta, pérdida de energía y otras fallas potenciales.

La desalineación puede ocurrir en el motor o eje provocando un desequilibrio entre los soportes del motor. La desalineación del motor se considera una de las principales razones por las que los dispositivos desperdician energía porque puede generar una mayor fricción en el eje. Este tipo de fricción generará un aumento innecesario del consumo de energía.

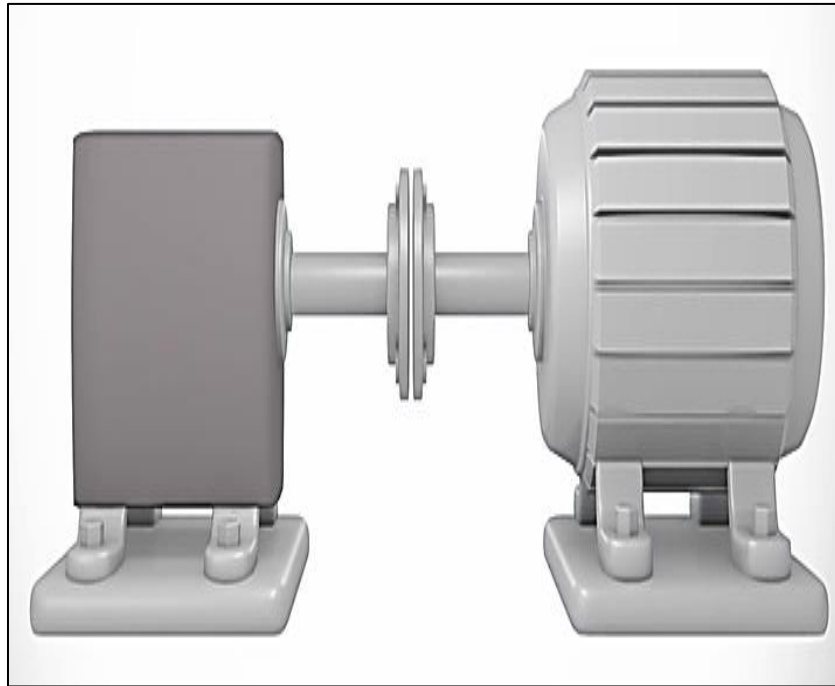


Figura 10. Motor y carga alineados

La desalineación es uno de los problemas más frecuentes de las máquinas rotativas, ya que, la presencia de holguras, procesos térmicos y dinámicos en los rotores, desgastes, fuerzas externas, etc., provocan la deformación del rotor y su desplazamiento favoreciendo así la desalineación. Industrialmente hay técnicas para corregir la perfecta alineación de los ejes, mediante relojes de alineación, o inclusive hasta el uso del láser para lograr una alineación perfecta. La relación del efecto de las desalineaciones de los ejes con la máquina eléctrica rotativa está en función de la frecuencia natural de la misma y de la estructura que la compone. (7)

2.2.5.6.6. FALLAS EN COJINETES

El propósito de inspeccionar los rodamientos dañados y las piezas de acoplamiento es determinar las causas probables del daño y evitar futuras fallas. Se debe implementar un procedimiento sistemático para ayudar a resolver las fallas de los cojinetes.

Cuando un rodamiento falla prematuramente, generalmente se debe a causas que podrían haberse evitado. Por esta razón, la posibilidad de llegar a conclusiones sobre las causas de un defecto mediante el estudio de su apariencia es muy útil. Es más importante corregir las causas y prevenir fallas futuras y los costos que siguen. La mayoría de las fallas de los cojinetes, como descamación y picadura, desprendimiento de patrones de desgaste inusuales, óxido y corrosión, arrastramiento, sesgo y otros; usualmente se atribuyen a un grupo relativamente

pequeño de causas que a menudo están interrelacionadas y se pueden corregir. Estas causas incluyen la lubricación, el montaje, la tensión operativa, la selección de rodamientos y la influencia ambiental.

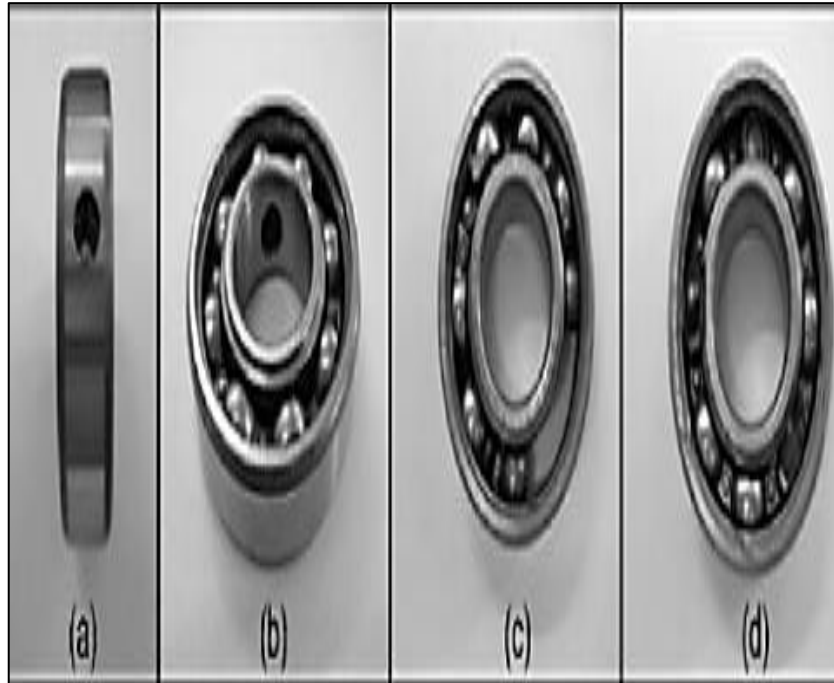


Figura 11. (a) Deterioro de la cara exterior, (b) deterioro de la cara interior, (c) deterioro de la jaula, (d) deterioro de la bola.

Así pues, la frecuencia característica que se produce en los cojinetes cuando el fallo es producido externamente o internamente es la siguiente:

$$f_v[\text{Hz}] = \left(\frac{N}{2} \right) \cdot f_r \cdot \left[1 \pm \frac{b_d \cdot \cos(\beta)}{d_p} \right]$$

Mientras que la frecuencia característica que se produce en los cojinetes cuando existe un fallo en los rodamientos es la siguiente:

$$f_v[\text{Hz}] = \left(\frac{d_p \cdot f_r}{2 \cdot b_d} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{b_d \cdot \cos(\beta)}{d_p} \right)^2 \right]$$

Para concluir, sí el fallo se produce en el tren de engranajes, la frecuencia característica es la siguiente:

2.2.5.6.7. FALLAS EN ENGRANAJES

El ruido y la vibración en las máquinas eléctricas pueden causar fallas reales y percibidas en el rendimiento y la calidad de un sistema impulsado por esa máquina eléctrica. El ruido puede tener fuentes estructurales (deslizamiento de engranajes, cojinetes u otras superficies móviles en contacto), aeroacústicas, inducidas por carga o electromagnéticas. Cada uno de estos mecanismos físicos pueden interactuar y ser retroalimentados a través de las vibraciones estructurales del sistema físico, por lo que resulta difícil separar las fuentes de ruido de una manera significativa. Muchas vibraciones estructurales pueden reducirse mediante soportes adicionales y la amortiguación del sistema a expensas de un mayor costo, tamaño y peso. Para proporcionar un sistema provechoso dentro de las limitaciones de diseño, debemos esbozar la estructura y el sistema para producir el rendimiento requerido al tiempo que se reduce la vibración y el ruido posterior.

Los trenes de engranaje pueden estar constituidos de diferentes formas: por 2 piñones, un piñón y un conjunto de engranajes o varios conjuntos formando una estructura más compleja.

Estos engranajes, elementos externos a la máquina eléctrica rotativa, influirán sobre ésta, de manera que es importante conocer sus efectos no sólo desde el punto de vista del mantenimiento, sino de la misma forma que para la detección de fallo de los cojinetes, se usa el análisis de las vibraciones a ciertas frecuencias, que se sabe que son características según el tipo de engranaje, como por ejemplo frecuencia de giro del engranaje, frecuencia de giro del piñón, frecuencia de paso de ensamblaje, etc. El caso más sencillo es un tren de engranajes simples, constituido por un sólo piñón y una rueda dentada, se deducen a continuación una serie de frecuencias propias del engranaje como:

- **FRECUENCIA DE GIRO DEL ENGRANAJE**, que no es más que la velocidad de giro de la rueda dentada de salida del engranaje expresada en hercios tal y como se representa en la siguiente ecuación, donde R_g es la velocidad de la rueda:

$$f_{rg} = \frac{R_g}{60}$$

- **FRECUENCIA DE GIRO DEL PIÑÓN**, análoga a la anterior, donde R_p es la velocidad del piñón en revoluciones por minuto:

$$f_{rp} = \frac{R_P}{60}$$

- **FRECUENCIA DE ENGRANAJE**, es la frecuencia en la cual engranan la rueda dentada y el piñón, donde N_g es el número de dientes de la rueda dentada y N_p es el número de dientes del piñón:

$$f_m = f_{rp} \times N_p = f_{rp} \times N_g$$

- **FRECUENCIA DE PASO DE ENSAMBLAJE ENTRE LA RUEDA DENTADA Y EL PIÑÓN**, en caso de defecto de algunos de los dientes, en ambos engranajes aparecerá una frecuencia de vibración como la que se muestra en la siguiente ecuación, donde N_a se define como el producto de los factores primos comunes del número de dientes del piñón y de la corona.

$$f_a = \frac{f_m}{N_a}$$

- **FRECUENCIA DE REPETICIÓN DE DIENTE**, si existiera algún defecto en ambos elementos simultáneamente, es decir, en el piñón y la rueda dentada, cuando coincidan se producirá un máximo de vibración, que responde a la siguiente ecuación matemática:

$$f_{tr} = \frac{N_a \cdot f_m}{N_p \cdot N_g}$$

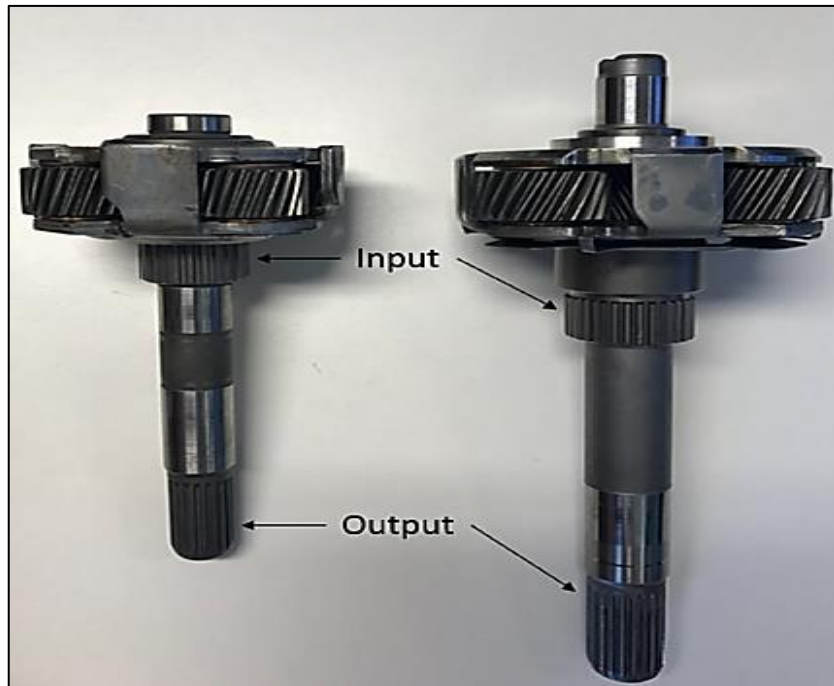


Figura 12. Engranajes planetarios. (8)

2.2.6. FALLAS POR DESBALANCE DE TENSIÓN

Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor no son equilibrados, se desarrollan corrientes desbalanceadas en los devanados del estator. A éstas se les conoce como corrientes de secuencia negativa que reducen el par del motor, produciendo dos efectos importantes: aumento de la temperatura en el devanado y aumento de su vibración.

Un aumento de la temperatura por encima de su valor permitido provocará daños al aislamiento, el aumento en los niveles de vibración probablemente provocará en algún grado soldaduras mecánicas. Cuando se presentan desbalances de voltaje, la potencia del motor disminuye, la cual debe ser multiplicada por un factor de reducción. De acuerdo a la norma NEMA MG-1 sección 14.36 ningún motor debe ser operada con desbalances de tensión superiores a un 5%.

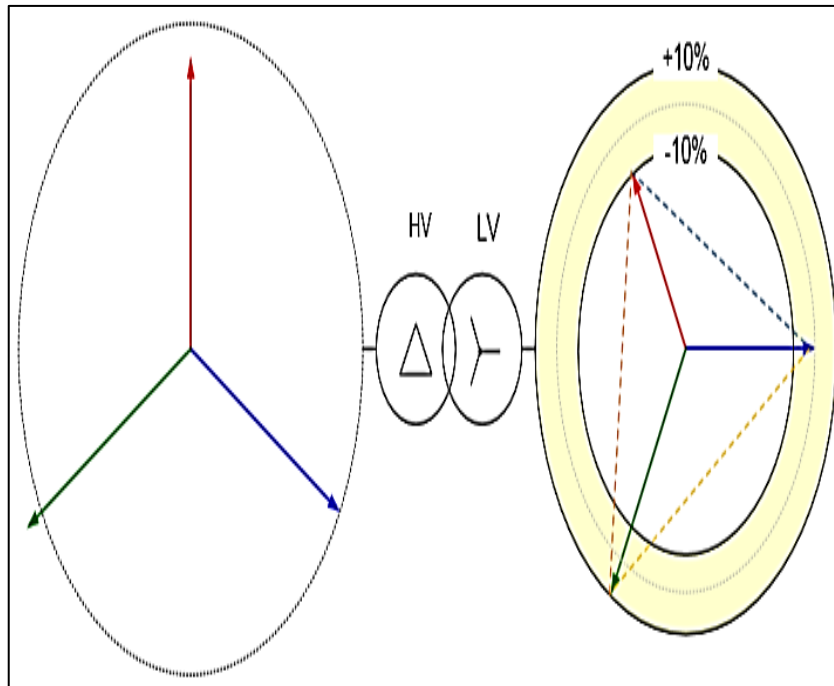


Figura 13. Consecuencia del desbalance de tensión.

2.2.6.1. ROTURA EN LAS BARRAS

Entre las fallas más comunes en los motores de inducción, se presentan las fallas en las barras, las cuales, pueden ser causadas por barras rotas del rotor, barras cuarteadas y/o corroídas, estos tipos de fallas se presentan en motores que arrancan y paran frecuentemente bajo carga.

La corriente de arranque del motor es más alta que durante su funcionamiento normal, durante el arranque se presenta un aumento de la temperatura en las barras del rotor. Cuando en el rotor una barra presenta gran resistencia, el aumento de la temperatura será más alto, provocando una desigualdad en la distribución de la temperatura del rotor y una expansión diferencial de las barras, lo que conlleva a roturas y grietas en las uniones de las barras con el anillo de cortocircuito del rotor.

Las fallas en el rotor debido a barras o anillos rotos, representan entre el 5% y 10% del total de las fallas producidas en el motor de inducción. La rotura de una barra produce un incremento significativo en la corriente por las barras adyacentes lo que puede facilitar la propagación de la falla; por este motivo, es de gran importancia su detección temprana.

2.2.7. ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTE

Las fallas más comunes que se presentan desde el punto de vista electromagnético se pueden dividir en dos categorías. Las que afectan la permeabilidad en el entrehierro (Pag) y las que afectan la fuerza en el entrehierro (MMF). Las variaciones en el entrehierro de la máquina son causadas por el movimiento mecánico entre el estator y el rotor. Daños en los cojinetes del motor ocasionan componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por la siguiente ecuación:

$$f_{bmg} = f_e \pm k \times f_v$$

Donde k es el número del armónico de los componentes de las frecuencias características f_v para cada tipo de defecto, como el daño en la pista interna, pista externa y bolas de los rodamientos, f_e frecuencia de la línea, f_{bmg} frecuencia ocasionado por daños en los cojinetes.

Las fallas en los motores de jaula de ardilla suelen estar relacionadas con las altas temperaturas alcanzadas durante su operación y con elevadas fuerzas centrífugas que soportan tanto las barras como los anillos de corto circuito, especialmente durante regímenes de funcionamiento transitorio.

La presencia de barras rotas, presenta variaciones en el campo magnético, lo que se traduce en la aparición de dos series de armónicos del campo giratorio, los cuales, inducen fuerzas electromotrices, dando lugar a la aparición de armónicos en la corriente de alimentación del motor. Estas corrientes se presentan como componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por medio de la siguiente ecuación:

$$f_{brb} = f_e \left[k \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm s \right]$$

Donde:

f_{brb} = Es la frecuencia producida por las barras rotas.

p = Es el número de pares de los polos del motor.

f_e = Es la frecuencia de la línea.

s = Es el deslizamiento del motor.

La valoración de la magnitud de la falla, se hace teniendo en cuenta los primeros componentes armónicos ($k/p = 1$), los cuales forman bandas laterales de la

frecuencia fundamental y están descritos por las siguientes ecuaciones para las bandas laterales superior e inferior respectivamente.

“Estudios realizados sobre una base de 300 motores de aplicación industrial, permitieron determinar la severidad de daños en barras (Tabla 3.3), teniendo en cuenta la diferencia entre la amplitud de los componentes correspondientes a la banda lateral inferior (LSB) y la amplitud de la componente fundamental fe.”

2.2.8. CONFIABILIDAD Y PREDICCIÓN DE FALLAS

La mantención de motores es un aspecto que requiere aunar criterios en una planta, esto es, definir políticas que indiquen por ejemplo si se realizará mantenimiento predictivo o mantenimiento correctivo. Dependiendo de dichas políticas, la planta usará ciertas tecnologías o recurso humano. En este contexto, hay ciertas consideraciones previas que deben ser vistas.

Tabla 5. Criterio de diagnóstico de daños en barras del motor.

DIFERENCIA ENTRE LA AMPLITUD, ENTRE LA BANDA LATERAL INFERIOR Y COMPONENTE FUNDAMENTAL (DB)	DIAGNÓSTICO
Diferencia <49	Motor sano
46 > Diferencia <49	Algún punto de alta resistencia
44 > Diferencia <46	Varios puntos de alta resistencia
39 > Diferencia <44	Muchos puntos de alta resistencia
35 > Diferencia <39	Al menos una barra rota
Diferencia <35	Varias barras rotas

2.2.9. DIAGNÓSTICO DE ESTADO DE MOTORES Y EVALUACIÓN ALTERNAS DE MANTENCIÓN

Dada la importancia que tienen los motores en todas las áreas de la industria en términos de producción como de consumo de energía eléctrica, es claro que una falla que implique paro de planta inesperado o no programado, conlleva a problemas de uso de recursos, pérdida de producción, y por consiguiente pérdidas económicas. Ya se ha hablado de la importancia de disponer de suministro de energía con un alto

grado de confiabilidad, pero en este apartado, se hará mención exclusiva de la confiabilidad de un motor.

En este contexto, las mantenciones de tipo predictivo se han erguido como una herramienta que, utilizada en forma apropiada, reporta enormes ahorros a la industria. Tradicionalmente se han utilizado esquemas de diagnóstico de estado de los motores que, básicamente consisten en la medición aleatoria o programada de parámetros electromecánicos de la máquina, como a la vez de las condiciones externas de operación. En este análisis caben en primer lugar la corriente, voltaje, torque, frecuencia y velocidad de operación, al mismo tiempo, comportamiento vibratorio, apriete de los pernos de anclaje, suciedad del motor, ruido, humo, etc. Esta medición, en principio, está a cargo de un operador que, usando elementos de medición y sus sentidos, lleva una bitácora de mediciones donde hace acopio de la información de cada equipo.

Es importante decir en este punto, dentro de la política de mantención de una fábrica, se debe separar el mantenimiento predictivo, del correctivo.

El mantenimiento correctivo se refiere a aquel en que una vez que, se detecta cierta falla, se procede a hacer cambio de la pieza o del motor completo, con las consecuencias descritas en el primer párrafo. Esta falla puede ser incipiente, dando muestras de fatiga que no se alcanzaron a medir a tiempo, no se detectaron por falta de monitoreo visual o por la inaccesibilidad a la máquina o, por otra parte, intempestiva, como consecuencia, por ejemplo: la rotura de una correa afectando el rotor del motor por embalaje o por sobrecalentamiento.

El mantenimiento predictivo, es el que se abordará en el presente trabajo, se refiere a un plan de mantenimiento programado, mediante algún modelo que determine cierta probabilidad de falla en el tiempo. Una de las herramientas más aceptadas para este tipo de análisis es la distribución de Weibull, que permite mediante un registro histórico de fallas determinar dicha probabilidad. Sin embargo, otra herramienta que permitiría una alta probabilidad de certeza en la detección de fallas incipientes, es el análisis continuo de la onda de salida de los parámetros eléctricos, particularmente de la corriente. En el mercado hay dispositivos que realizan análisis de este tipo de análisis tal como el MCM (motor condition monitor) que permite indicar el estado del motor en tiempo real y detectar cuando una falla recién empieza a manifestarse.

Como se indicó, la idea es enfocarse en el análisis predictivo, por lo que se analizarán de los dos métodos descritos; solamente, el análisis de la corriente mediante la transformada de Hilbert.

Idealmente, este tipo de análisis permite tener acceso remoto a equipos que un operador físicamente no tendría. Además, hay ventajas evidentes como lo son el análisis simultáneo de los equipos en la pantalla de un computador, y por otra parte, se evitan las exposiciones a un accidente en el curso de las mediciones. Finalmente, nunca se debe descartar el ojo humano en la detección de anomalías. O el resto de los sentidos como el olfato.

La gran diferencia que existe entre las dos alternativas abordadas, es que el análisis de Weibull requiere de una historia de fallas, mientras que el análisis de la onda de corriente se basa en un modelo de comportamiento ideal, y si bien necesita un set point, no requiere de una base de datos con fallas por motor. (9)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. MÉTODO CIENTÍFICO

Su aplicación es perceptible en el proceso racional, metódico (estructuralista) y dialéctico (lógico) de la investigación.

3.1.2. MÉTODO GENERAL

Para que se dé el conocimiento científico en forma razonada y válida, un método general de investigación deberá cumplir unos requisitos específicos de la ciencia. En este sentido para la investigación se determinó los siguientes métodos:

- **Analítico – sintético.** Se considera que el método es analítico porque descompondrá en partes los aspectos de lo todo estudiado, para entenderlo, es sintético porque se trata de entender el fenómeno como un sistema.
- **Hipotético – deductivo.** Porque se trata de comprobar una hipótesis planteada a comienzos de la investigación.

3.1.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Por su finalidad. Aplicada, Pues se lleva nociones científicas a la realidad, contribuyendo de esta forma tanto a la sociedad como a la ciencia.

3.1.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Investigación descriptiva correlacional, por que actúan sobre dos variables de tipo dependiente (V.D. y V. I.) miden y evalúan con precisión el grado de relación que existen entre las variables.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

- **Población**

Se denomina población a un conjunto de elementos que contiene una o más características observables de naturaleza cuantitativa o cualitativa, para la siguiente investigación la población consta de 12 motores de inducción trifásicos de C.A. en funcionamiento en la papelería Atlas en la región de Lima Perú.

- **Muestra**

En la presente investigación se tendrá como muestra a seis motores (6), a nivel de la región de Lima (sobre todo en la ciudad de Lima); motores de inducción trifásicos de C.A. incorporados desde varios puntos de energización, se tiene un amplio margen de potencias para que sea una muestra válida tomando desde 50 kW hasta 550 kW.

3.3. INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE DATOS

La investigación presentada es documental, experimental, explicativa y aplicada, se apoya en fuentes de naturaleza documental como: documentos, archivos, expedientes, revistas, etc.

Explicativa, porque su objetivo es resaltar los aspectos básicos de una problemática específica y encontrar la metodología adecuada para elaborar una investigación posterior. Aplicada, porque se caracteriza en buscar la aplicación de los conocimientos adquiridos.

Se tomará como base reportes e informes (datos históricos de cada uno de los motores) sobre los motores de inducción trifásicos de C.A.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS PREDICTIVO PRÁCTICO UTILIZANDO TRANSFORMADA DE HILBERT

4.1. APLICACIÓN PRÁCTICA

Datos tomados de la planta de **PAPELES ATLAS**.

Aplicación de la transformada de Hilbert como método útil para diagnosticar del estado de las partes internas en el motor de inducción.

La hipótesis fundamental de este análisis, demuestra que al aplicar la transformada de Hilbert de una señal de corriente, se puede obtener su envolvente, la que permite prescindir de la frecuencia fundamental en el análisis, una vez que se ha trasladado las componentes de tiempo al espectro de Fourier. El procedimiento consiste en tres pasos básicos:

- **SELECCIÓN DE MUESTRA PARA SER SOMETIDA A ANÁLISIS.** La selección tiene que ver con la accesibilidad física de los equipos, y por otra parte, el personal técnico juega un papel importante (conoce de cerca el equipamiento y tiene mejor criterio).
- **TOMA DE DATOS EN PLANTA DE PAPELES ATLAS.** Parte instrumental para registrar señales de la corriente de estator de los motores seleccionados en el paso anterior.
- **ANÁLISIS DE DATOS.** Procesamiento tabular de las señales donde se seleccionan los parámetros óptimos y se aplica la transformada de Hilbert. finalmente, se trasladan los vectores al espacio de la frecuencia con la

transformada de Fourier y se identifican las frecuencias características de fallas, teniendo como base de datos las fallas en la tabulación.

4.1.1. SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Se seleccionó 06 motores. En lo posible se trató que la muestra tenga amplio margen de potencias para que sea una muestra válida, tomando desde 50 kW hasta 550 kW. La selección se muestra en la tabla 6.

4.1.2. TOMA DE DATOS

Instrumentos para la toma de Datos: Analizador de redes (tiene incorporado cosfímetro), voltímetros, amperímetros, vatímetro, etc.

Personal: Personal calificado de la compañía para operar el equipo.

SOFTWARE UTILIZADO

Cabe señalar el hecho de que los transformadores Hilbert ideales no son realizables. Sin embargo, se han desarrollado algoritmos que aproximan el Hilbert Transformer, como la técnica de diseño de filtros FIR de Parks-McClellan, que se puede utilizar. MATLAB® Signal Processing Toolbox™ proporciona la función `rpm` que diseña estos filtros. Además, dado que el filtro introduce un retardo, necesitamos compensar ese retraso añadiendo retardo ($N/2$, donde N es el orden de filtro) a la señal que se multiplica por el término coseno.

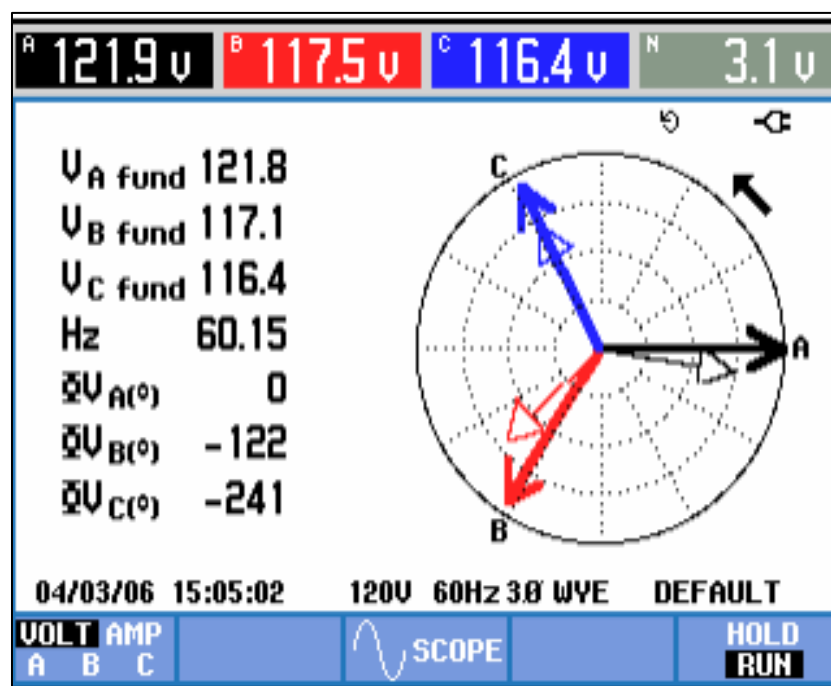
4.1.3. EQUIPO UTILIZADO

Un analizador de redes modelo Fluke 8335FK.



Figura 14. Equipo analizador de redes.

En la pantalla de osciloscopio y diagrama fasorial resultan útiles para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimetricas están conectadas correctamente en el diagrama vectorial, las corrientes y tensiones de fase L1 (A), L2 (B), L3 (C) Y N neutro deben aparecer sucesivamente cuando se observa en el sentido de las agujas del reloj.

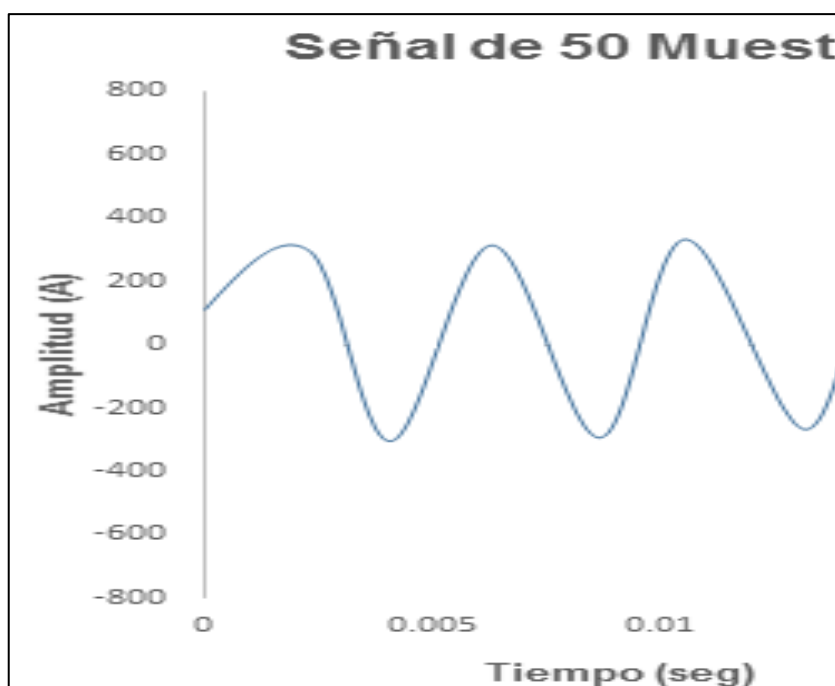


Los motores, tal como se muestra en la tabla 1, fueron nombrados m1, m2, _____, m6 durante el resto del trabajo.

4.2. RESULTADOS DEL ANALIZADOR DE REDES

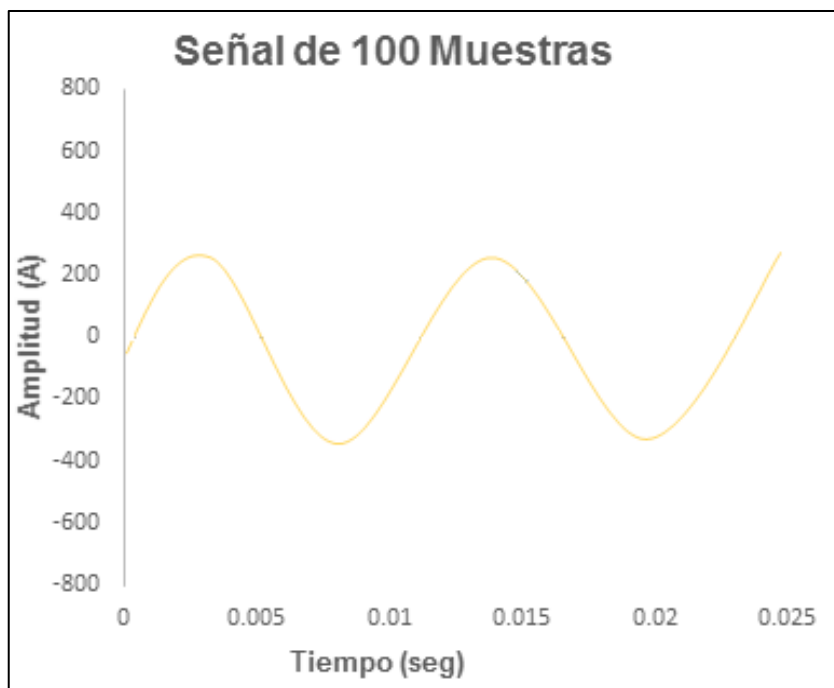
4.2.1. FALLAS EN RODAMIENTO

Figura 15. Motor uno (m1) con una señal de 50 muestras



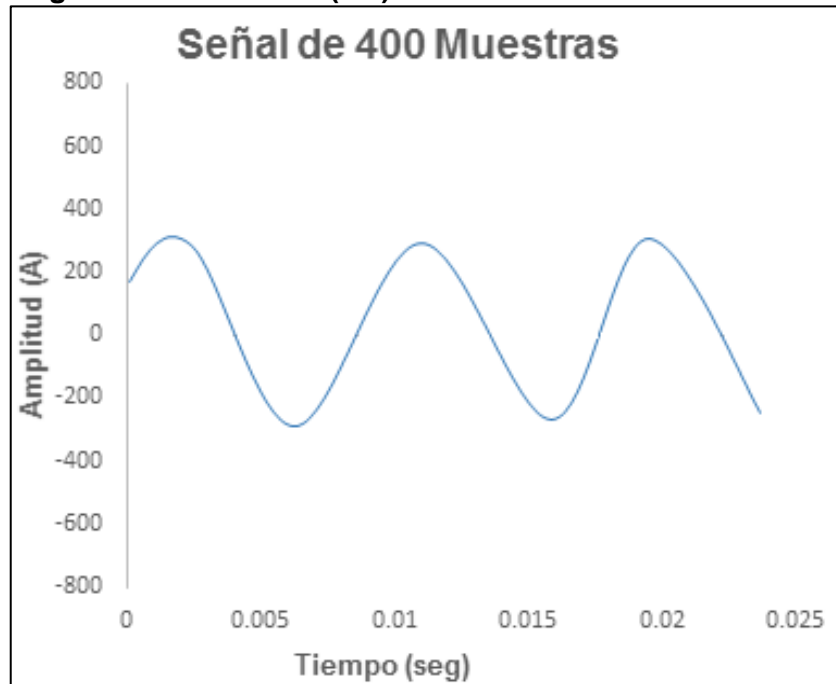
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 3.65 de E en una señal de 50 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, requiere de un mantenimiento porque está fuera del intervalo.

Figura 16. Motor dos (m2) con una señal de 100 muestras



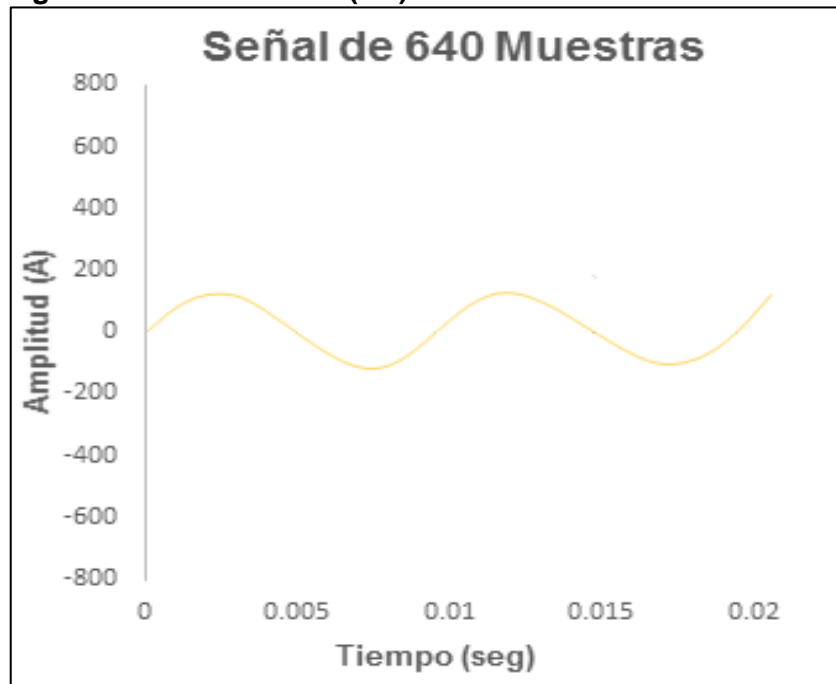
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 2.33 de “E” en una señal de 100 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 17. Motor tres (m3) con una señal de 400 muestras



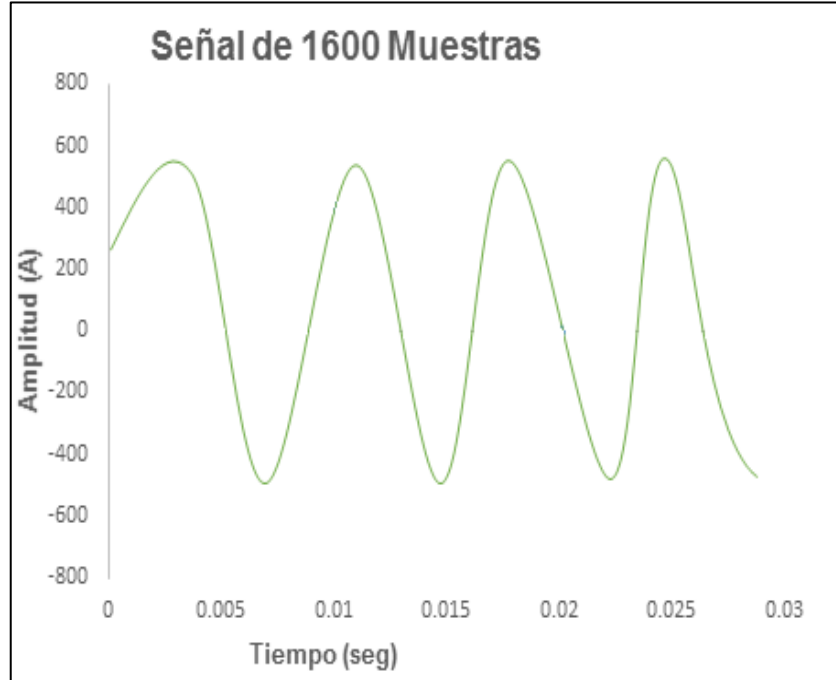
Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 2.40 de E en una señal de 400 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 18. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras



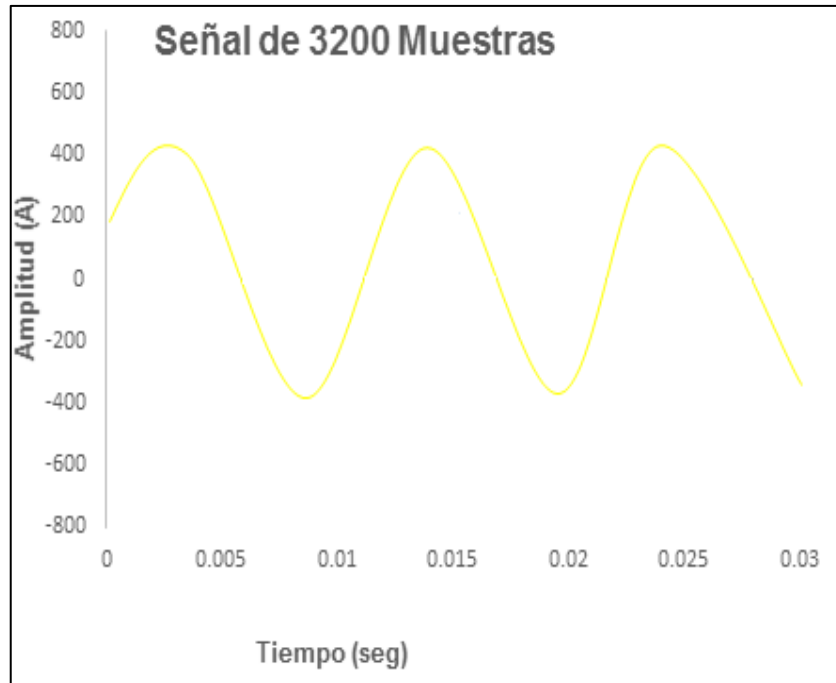
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.30 de E en una señal de 640 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 19. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras



Según el grafico se visualiza que tiene valor de 5.20 de “E” en una señal de 1600 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, requiere de un mantenimiento porque está fuera del intervalo.

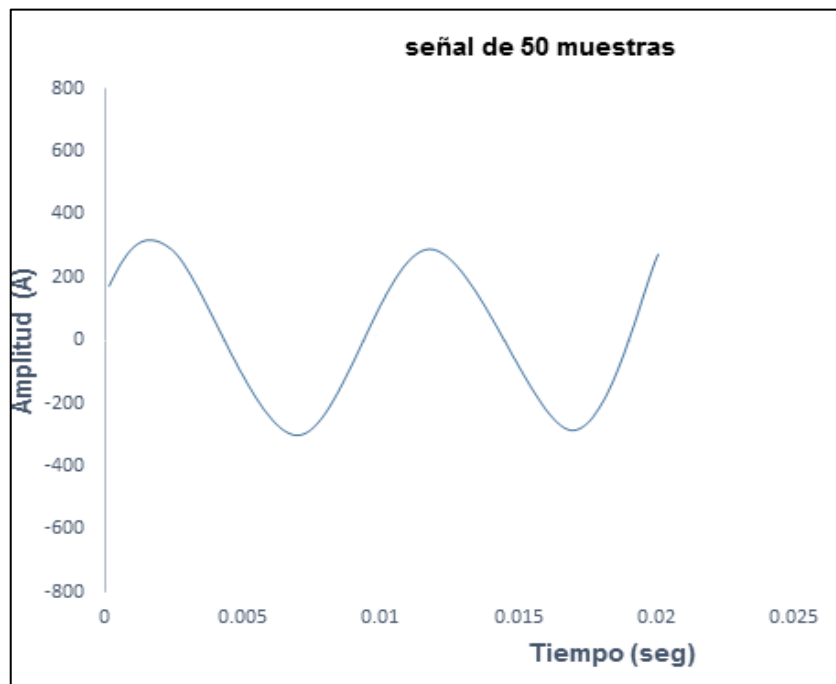
Figura 20. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras



Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 4.00 de "E" en una señal de 3200 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, requiere de un mantenimiento porque está fuera del intervalo.

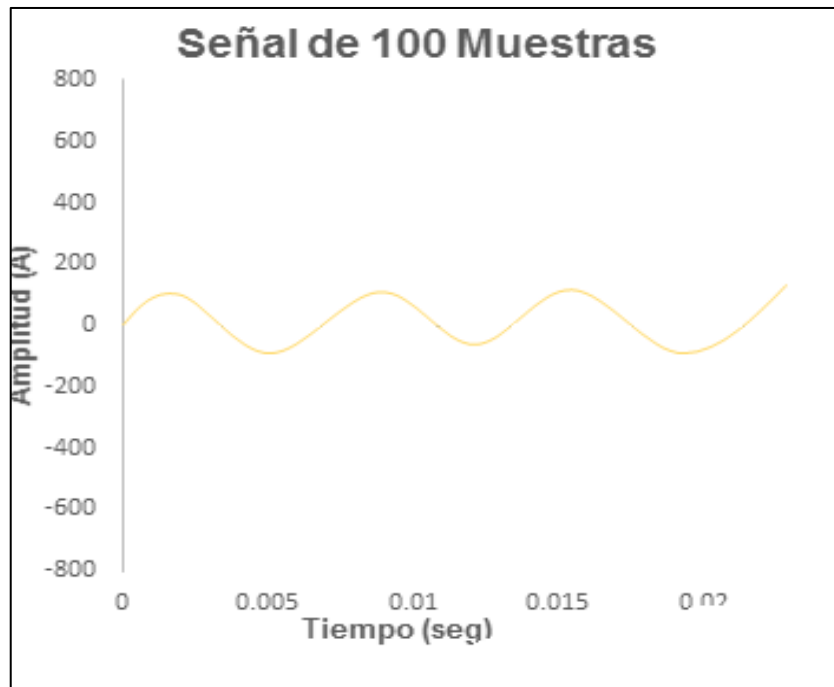
4.2.2. FALLAS EN ROTOR

Figura 21. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras



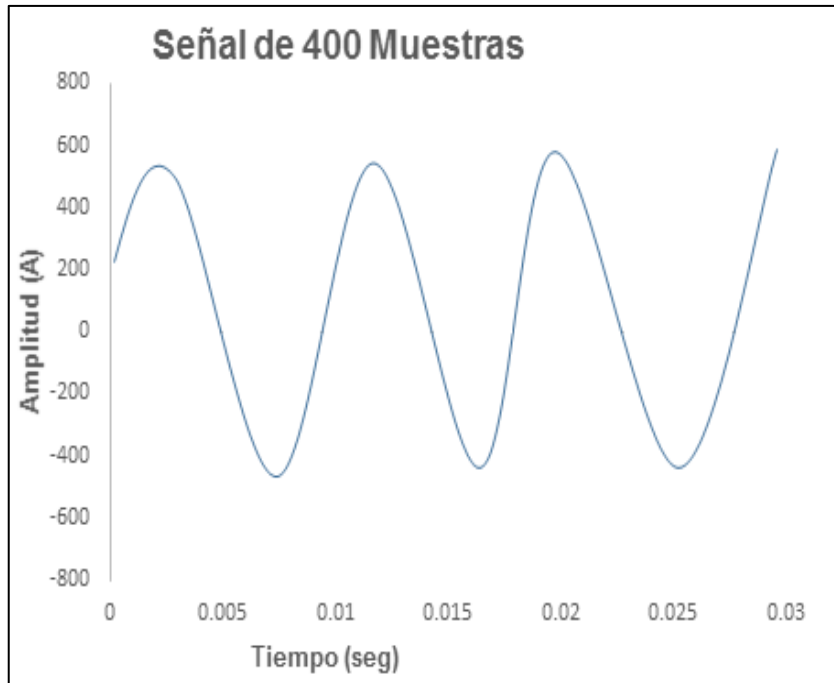
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 3.31 de “E” en una señal de 50 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, requiere de un mantenimiento porque está fuera del intervalo.

Figura 22. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras



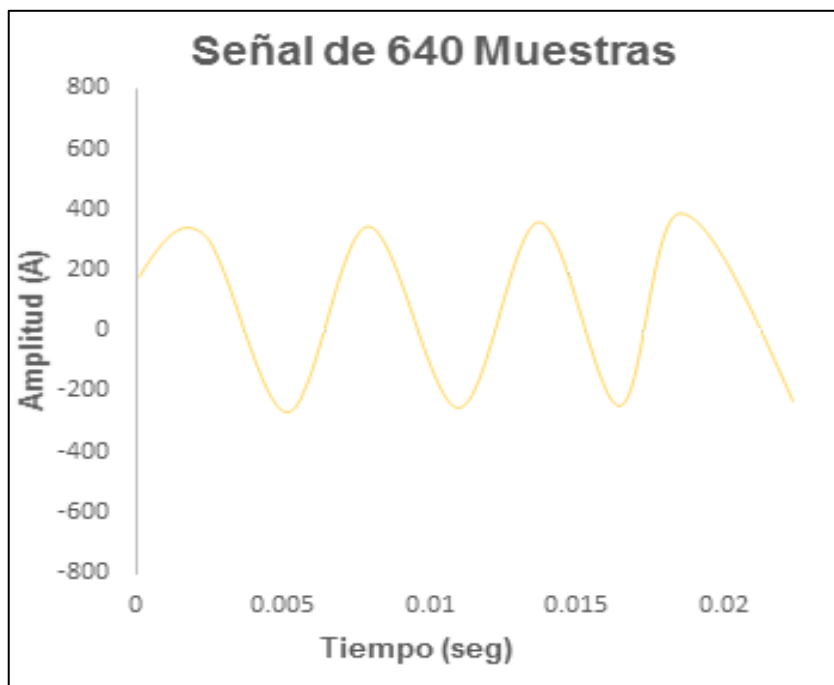
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.20 de “E” en una señal de 1600 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 23. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras



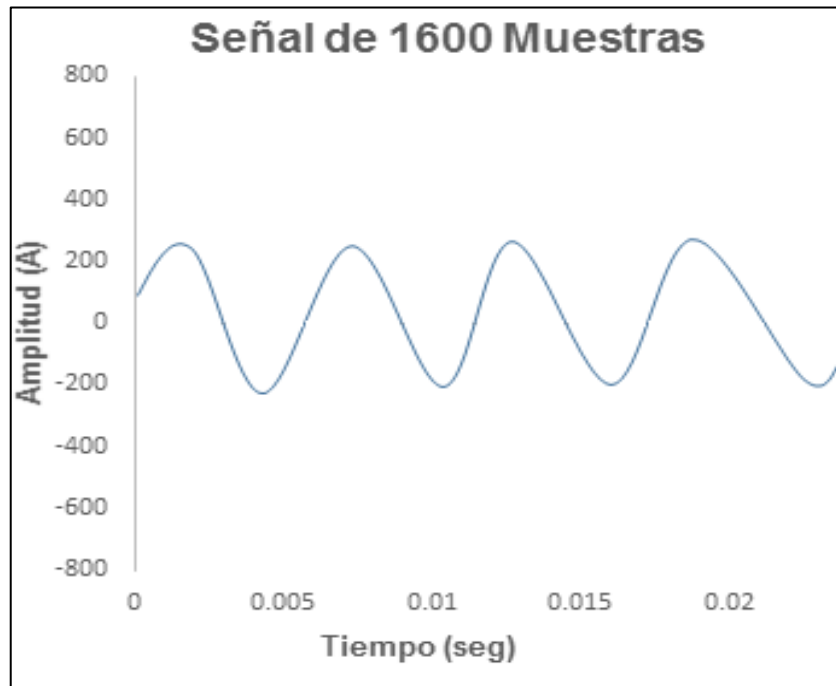
Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 4.34 de “E” en una señal de 400 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 24. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras



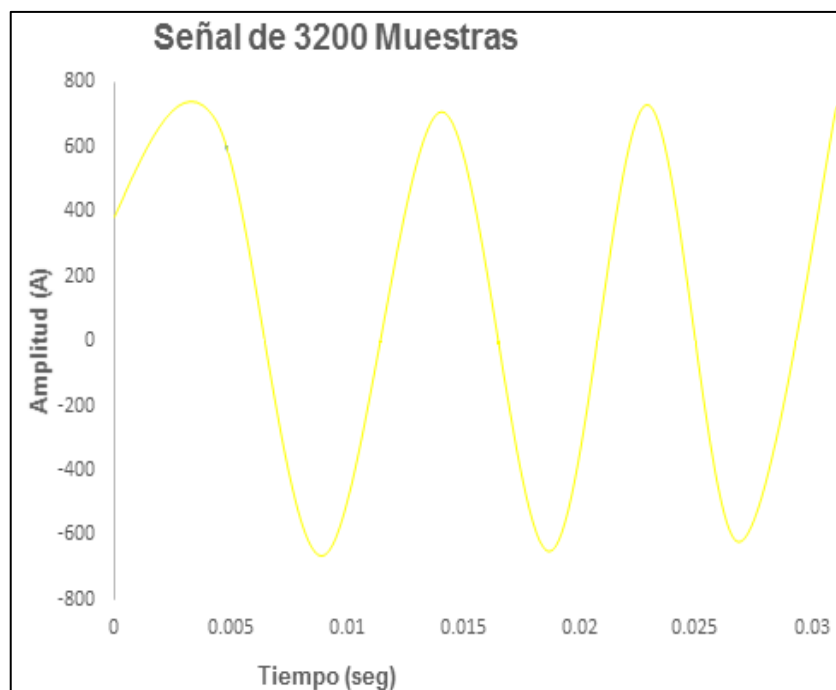
Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 2.78 de “E” en una señal de 640 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 25. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras



Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 2.11 de "E" en una señal de 1600 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 26. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras



Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 6.00 de "E" en una señal de 3200 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de

potencia de 50 kW – 550 kW, requiere un mantenimiento porque eta fuera del intervalo.

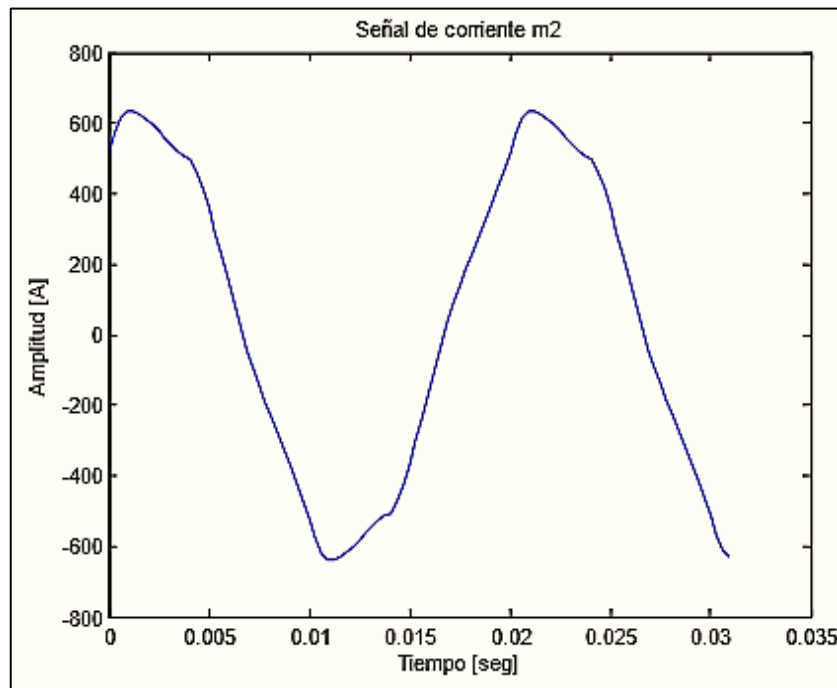
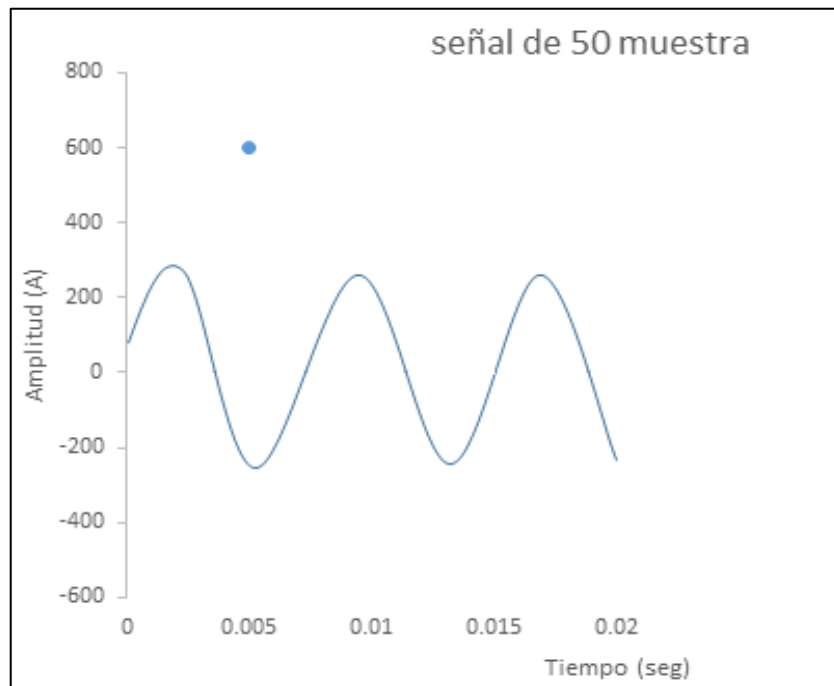


Figura 27. Amplitud de corriente para el motor M2.

La amplitud de corriente de los motores de inducción varía en un rango de 56,9 A a 490 A; para el caso del motor m3 cuya corriente nominal es de 56,9 se muestra su espectro temporal para 100 muestras.

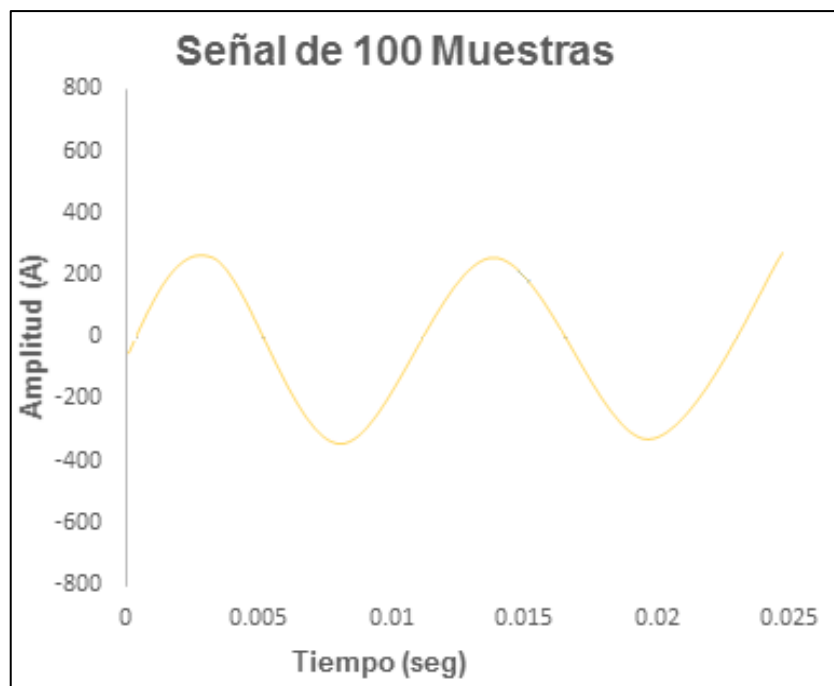
4.2.3. FALLAS EN EXCENTRICIDAD

Figura 28. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras



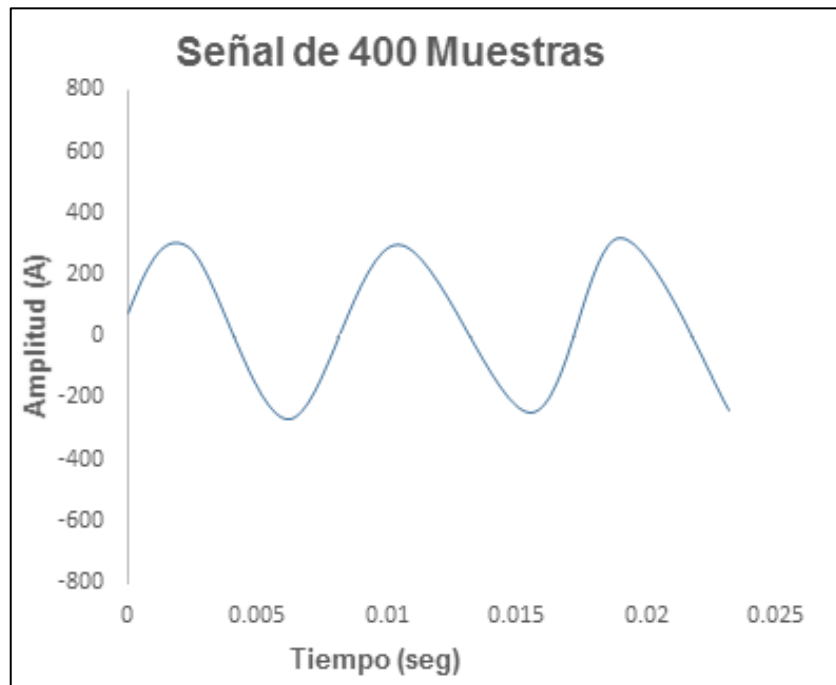
Según el gráfico se visualiza que tiene un valor de 2.65 de "E" en una señal de 50 muestras, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 29. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras



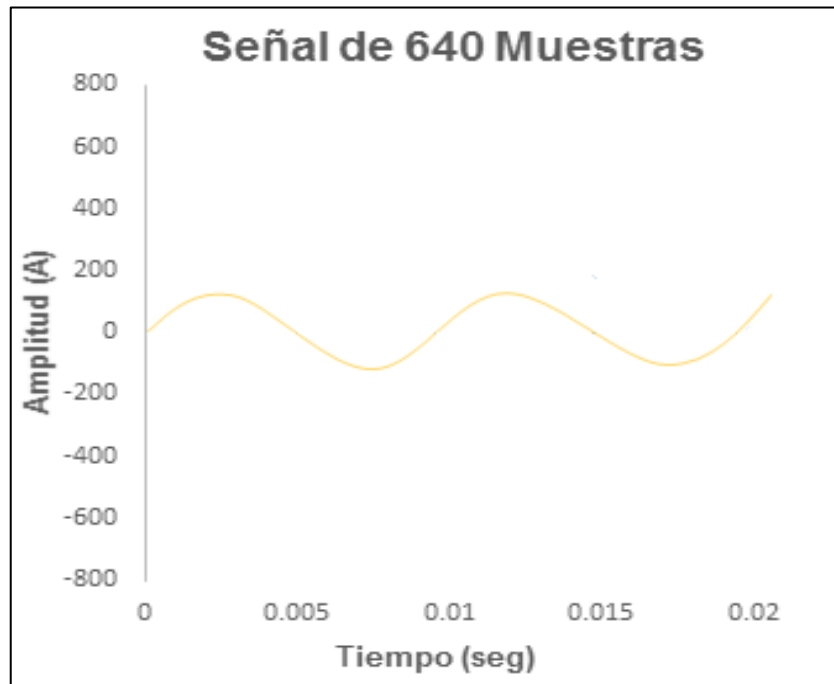
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.20 de “E” en una señal de 100 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 30. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras



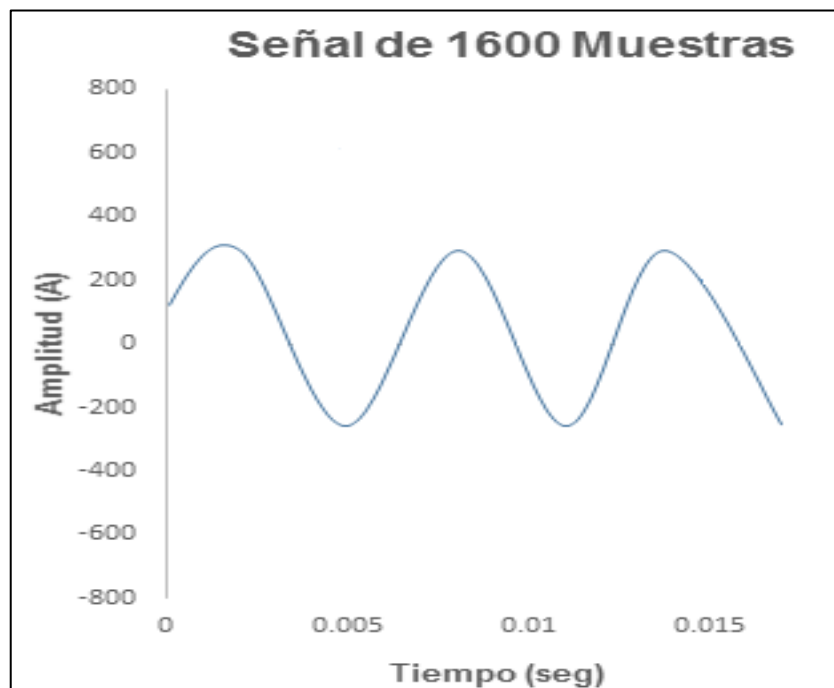
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 2.67 de “E” en una señal de 400 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, tiene un buen trabajo porque está dentro del intervalo.

Figura 31. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras



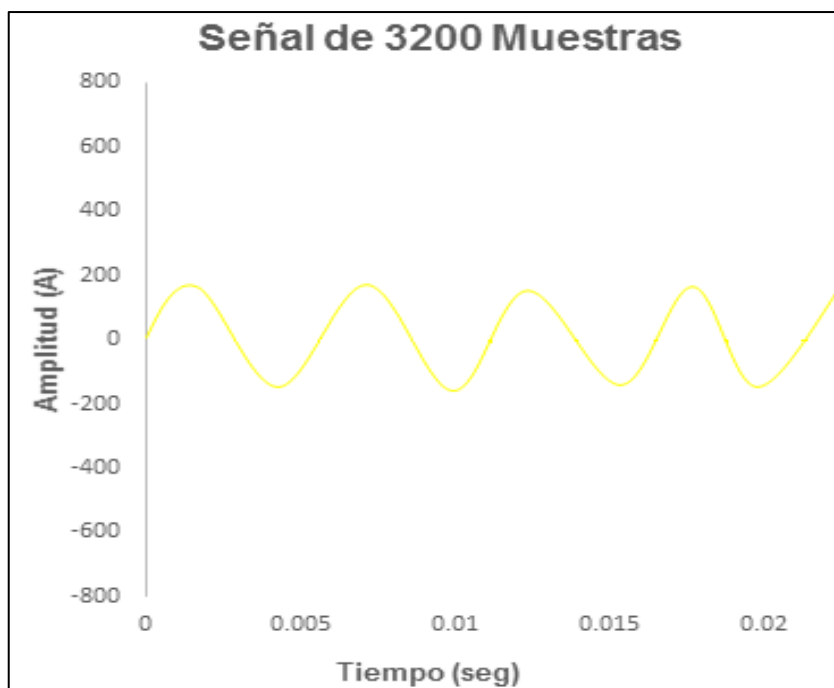
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.30 de "E" en una señal de 640 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

Figura 32. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras



Según el grafico se visualiza que tiene valor de 3.03 de “E” en una señal de 1600 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, requiere de mantenimiento porque está fuera del intervalo.

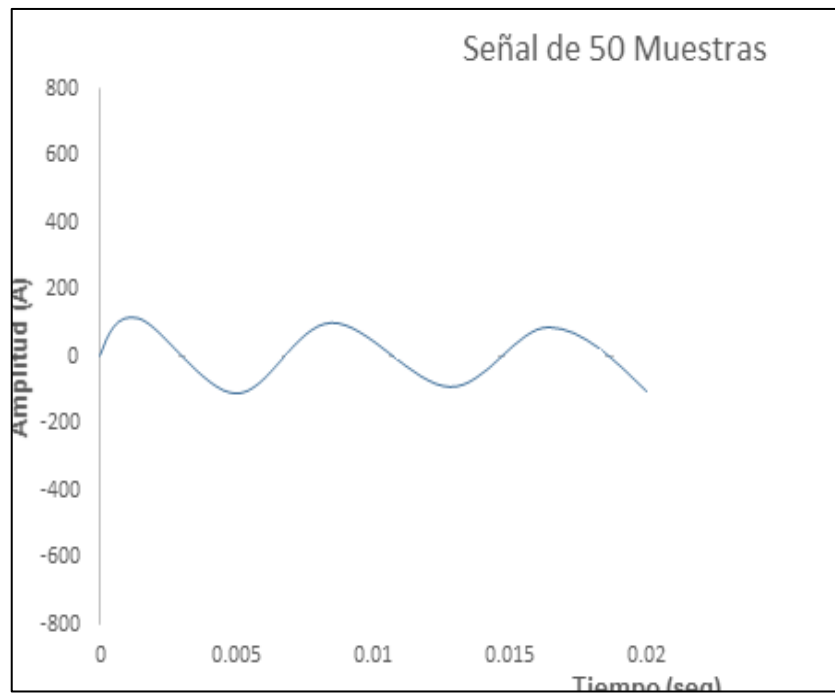
Figura 33. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras



Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.70 de “E” en una señal de 3200 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

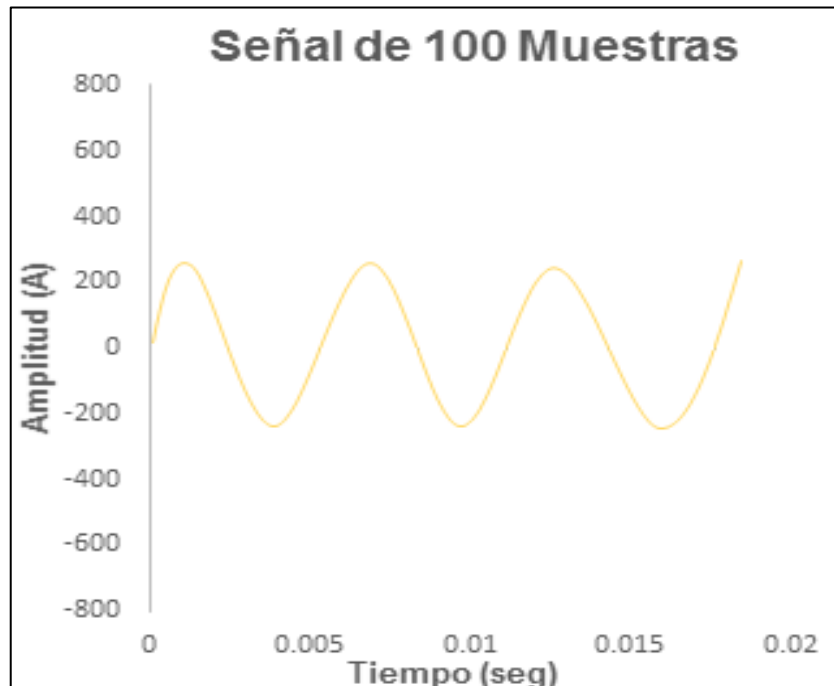
4.2.4. FALLAS EN EL ESTATOR

Figura 34. Motor uno (M1) con una señal de 50 muestras



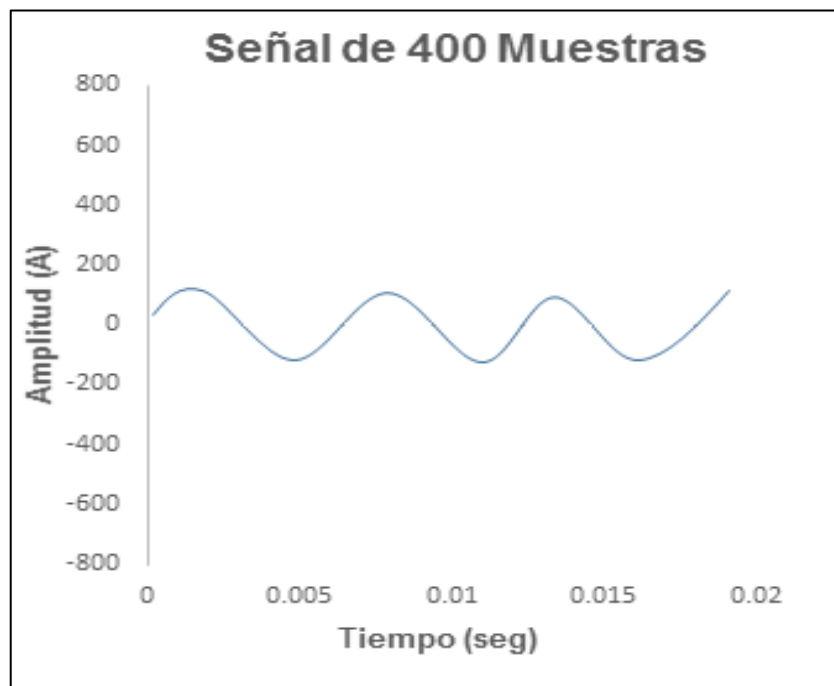
Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 1.60 de “E” en una señal de 50 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

Figura 35. Motor dos (M2) con una señal de 100 muestras



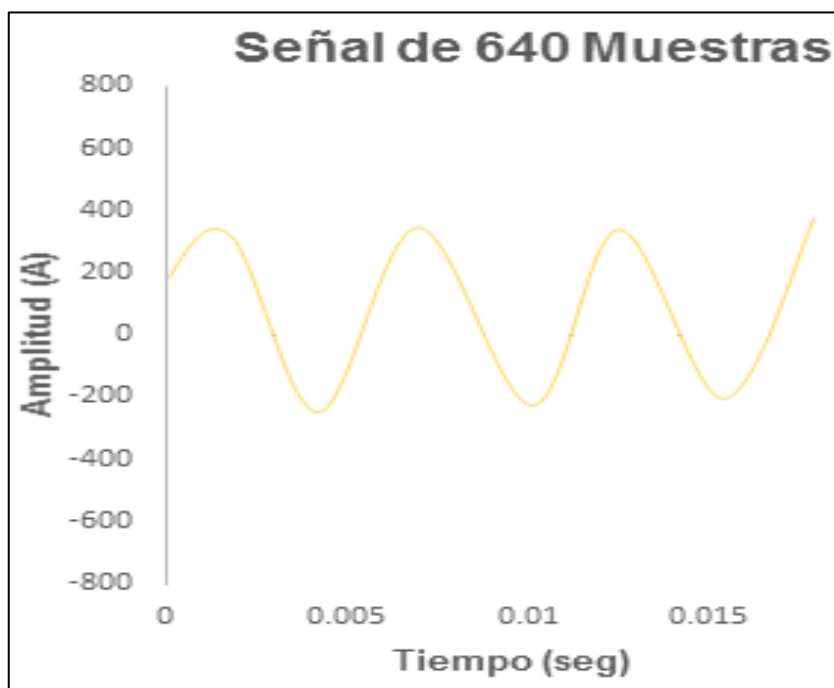
Según el gráfico se visualiza que tiene un valor de 2.34 de "E" en una señal de 100 muestras, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

Figura 36. Motor tres (M3) con una señal de 400 muestras



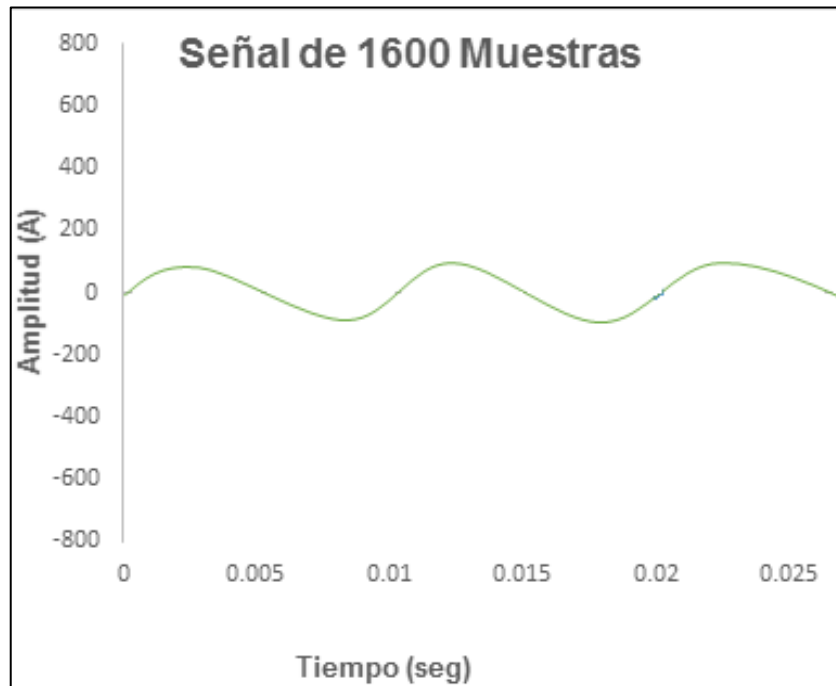
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.43 de “E” en una señal de 400 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

Figura 37. Motor cuatro (M4) con una señal de 640 muestras



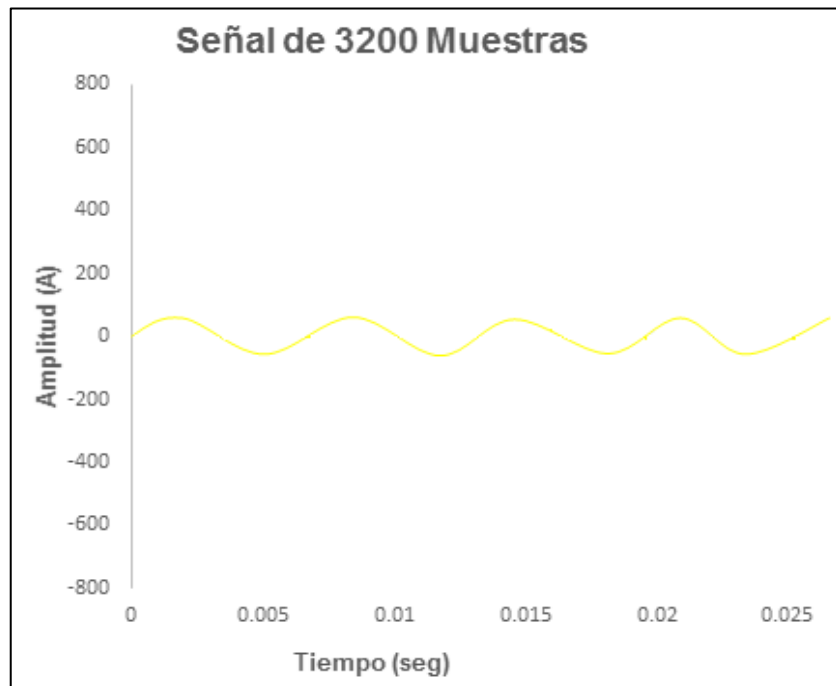
Según el grafico se visualiza que tiene valor de 3.35 de “E” en una señal de 640 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, requiere de mantenimiento porque está fuera del intervalo.

Figura 38. Motor cinco (M5) con una señal de 1600 muestras



Según el gráfico se visualiza que tiene valor de 1.25 de "E" en una señal de 1600 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

Figura 39. Motor seis (M6) con una señal de 3200 muestras



Según el grafico se visualiza que tiene valor de 1.18 de “E” en una señal de 3200 muestra, de la cual se puede deducir que el motor de inducción trifásico de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW, no requiere de ningún mantenimiento porque está trabajando bien y está dentro del intervalo.

4.3. SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR DOS

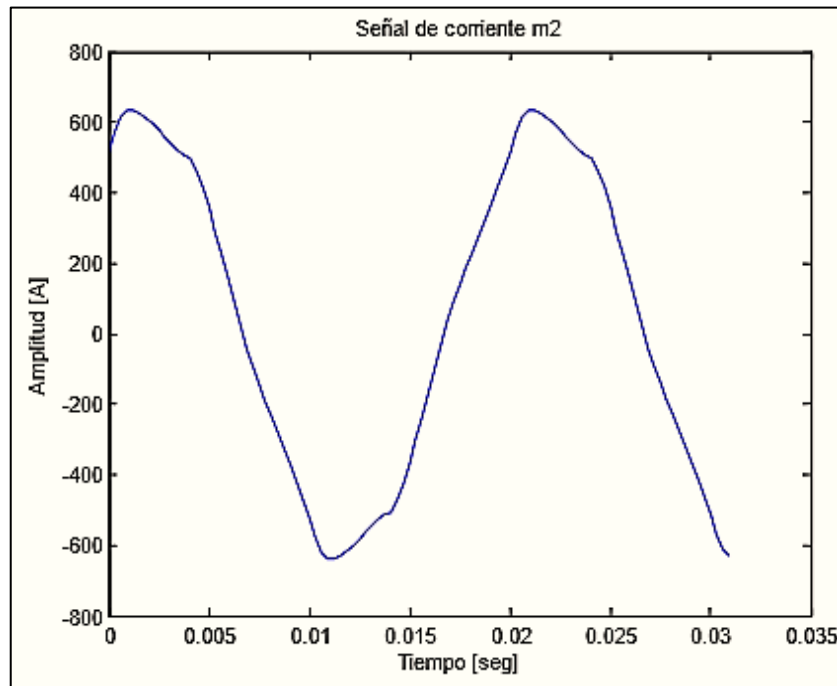


Figura 40. Amplitud de corriente para el motor M2.

La amplitud de corriente de los motores de inducción varía en un rango de 56,9 A a 490 A; para el caso del motor m3 cuya corriente nominal es de 56,9 se muestra su espectro temporal para 100 muestras.

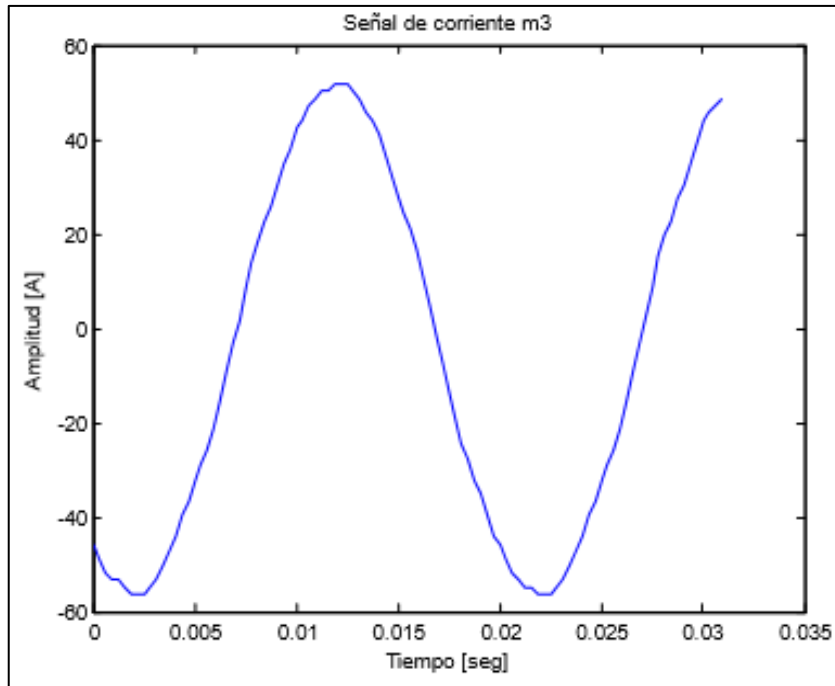


Figura 41. Amplitud de corriente para el motor m3 de la muestra

A medida que se aumentan las muestras, se puede apreciar un mayor número de ciclos de red. Por ejemplo, para 400 muestras se tienen 10 ciclos. Esto se muestra en la figura 18.

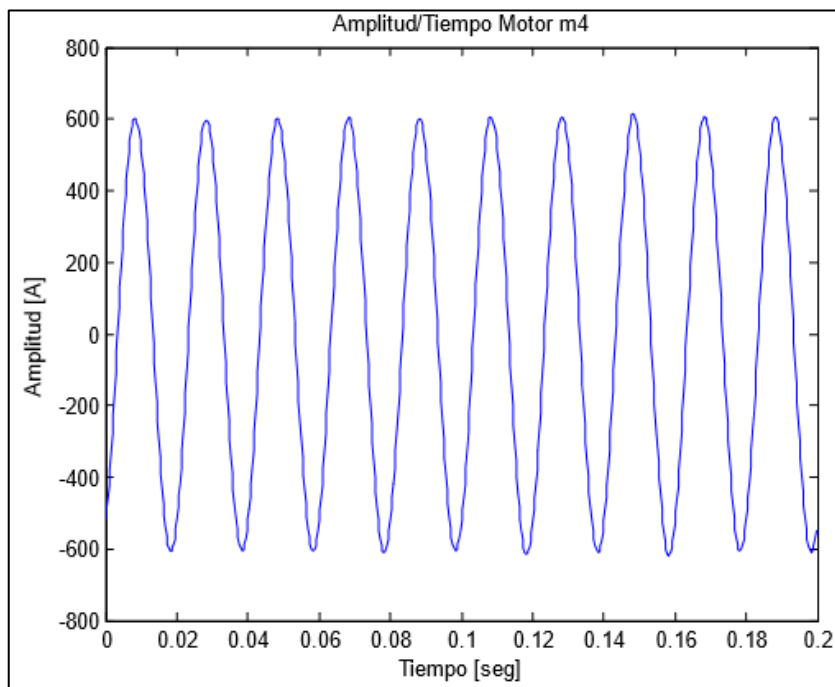


Figura 42. Amplitud de corriente para el motor m4 de la 640 de muestra.

Seguidamente se analiza el espectro de frecuencia a la señal de corriente de estator de un motor de inducción. Esto es lo que se hará a continuación para las señales mostradas anteriormente, mediante la utilización de la Transformada de Fourier y luego la Transformada de Hilbert. Al respecto conviene tener en cuenta ciertas consideraciones previas:

- Los vectores de corriente se dan a un tiempo de muestreo de 312,5 microsegundos. Este tiempo se puede aumentar intercalando las señales, pero no se puede disminuir.
- La tasa de muestreo, por lo tanto, es el inverso de dicho número. La respuesta en frecuencia va a estar dada por tantos puntos como muestras se tomen, el espacio entre cada coeficiente de la transformada de Fourier se denomina Resolución de Frecuencia y está dado por el inverso del tiempo total de la muestra.

Es decir, se tienen las siguientes variables:

- L = Número de muestras.
- T = Tiempo entre cada muestra.
- F_s = Frecuencia de muestreo.
- $D = T * L$ = Tiempo total de la muestra.
- $f_o = \frac{1}{D}$ = Resolución de frecuencia.
- $f_c = \frac{D}{0.02}$ = Ciclos de red resolución de frecuencia

Dado que la transformada de Fourier es una función del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, falta definir el recorrido de dicha función.: El dominio es la corriente de estator de los motores de inducción.

El recorrido está dado por el rango de frecuencias entre la frecuencia máxima y mínima.

Para la frecuencia máxima: El teorema de Nyquist, el cual indica que para detectar una frecuencia máxima f_s ., es necesario muestrear a una frecuencia $2f_s$. Por tanto, en este caso, dado que se elige una frecuencia de muestreo f_s , limitada a un máximo de 3200 Hz, la frecuencia máxima detectable será:

$$f_{\max} = \frac{f_s}{2}$$

Por otra parte, la frecuencia mínima, estará dada por el tiempo de muestreo. Para detectar una señal periódica, es necesario saber que es periódica. Detectando 2 de sus períodos al menos, se puede caracterizar la función como tal. Por ello, la frecuencia mínima será:

$$f_{\min} = \frac{D}{2}$$

Tabla 6. Variables que caracterizan la señal en tiempo y frecuencia.

VARIABLE	DESIGNACIÓN	VALOR
Número de muestra (seg.)	L	400
Tiempo entre cada muestra (seg.)	T	0.0003125
Frecuencia de muestreo (Hz.)	Fs	3200
Duración de la muestra (seg.)	D	0.125
Resolución de frecuencia (Hz.)	Fo	8
Frecuencia máxima detectable (Hz.)	Fmáx	1600
Frecuencia mínima detectable (Hz.)	Fmín	0.0625
Ciclos de red	Fc	6.25

Para las variables dadas en la tabla 7, donde las variables de color tenue son independientes y las en blanco son dependientes, tiene un espectro de frecuencias como se muestra en la figura 18.

De figura 18 se observa las amplitudes de:

- h = frecuencia fundamental 50 Hz.

- $h_5 = 250 \text{ Hz}$.
- $h_7 = 350 \text{ Hz}$.
- $h_{11} = 550 \text{ Hz}$.

Para ello, se tomará en primer lugar una resolución de frecuencia de 1 Hz, con lo cual el tiempo de muestra queda fijo en 1 seg.

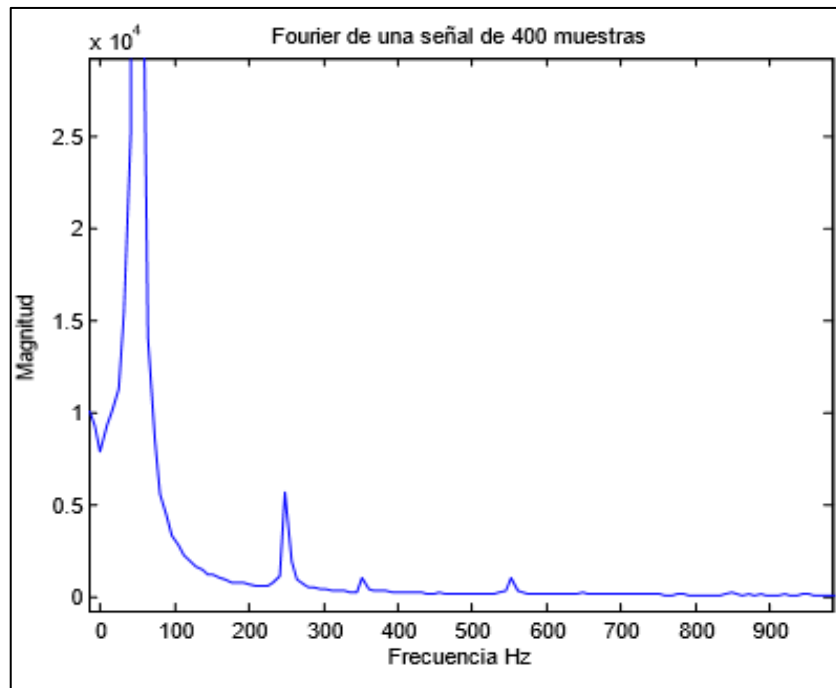


Figura 43. Respuesta en frecuencia mediante Fourier en el M4.

De la figura 19 se observa las amplitudes de:

- $h =$ frecuencia fundamental 50 Hz.
- $h_5 = 250 \text{ Hz}$.
- $h_7 = 350 \text{ Hz}$.
- $h_{11} = 550 \text{ Hz}$.

Para ello, se tomará en primer lugar una resolución de frecuencia de 1 Hz, con lo cual el tiempo de muestra queda fijo en 1 seg. (10)

Tabla 7. Variables para la respuesta en frecuencia de una señal de 3200 muestras en el M6.

VARIABLE	DESIGNACIÓN	VALOR
Número de muestra (seg.)	L	3200
Tiempo entre cada muestra (seg.)	T	0.0003125
Frecuencia de muestreo (Hz.)	Fs	3200
Duración de la muestra (seg.)	D	0.125
Resolución de frecuencia (Hz.)	Fo	8
Frecuencia máxima detectable (Hz.)	Fmáx	1600
Frecuencia mínima detectable (Hz.)	Fmín	0.0625
Ciclos de red	Fc	6.25

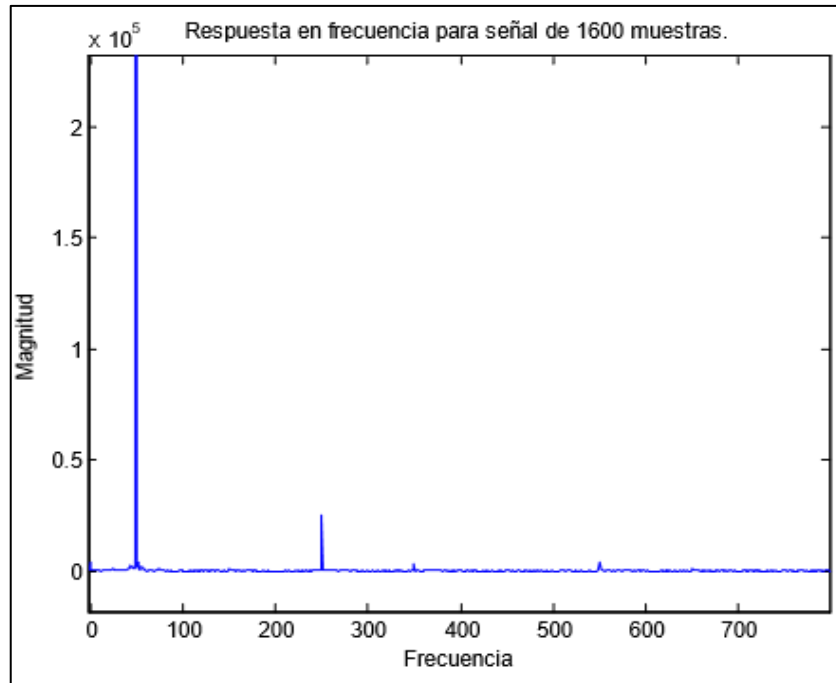


Figura 44. Fourier de la señal de 1600 en el M5 muestras.

La información proporcionada es la misma en ambas gráficas, sin embargo, es posible distinguir los componentes de armónicas de forma más precisa en el segundo ejemplo. En primer lugar, de los ejemplos mostrados anteriormente, se concluye que, a mayor frecuencia de muestreo, hay mayor frecuencia máxima. Además, la resolución de frecuencia ya se indicó que depende solamente de la duración de la muestra.

Tabla 8. Frecuencia de falla análisis clásico y de envolvente.

DENOMINACIÓN MOTOR	FRECUENCIA DE LA RED		EXCENRICIDAD DINÁMICA		SATURACIÓN	
	CLÁSICO	ENVOLVENTE	CLÁSICO	ENVOLVENTE	CLÁSICO	ENVOLVENTE
	HZ	HZ	HZ	HZ	HZ	HZ
m1	50	0	35,0 64,8	14,9	150,250,350	100, 200, 300
m2	50	0	25,2 74,6	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m3	50	0	25,2 74,5	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m4	50	0	25,4 74,6	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m5	50	0	25,4 74,7	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m6	50	0	25,3 74,5	24,8	150,250,350	100, 200, 300

Tabla 9. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente.

DENOMINACIÓN MOTOR	RANURADO DE ROTOR		RANURADO DE ROTOR Y EXCENRICIDAD DINÁMICA		RANURADO DE ROTOR Y SATURACIÓN	
	CLÁSICO	ENVOLVENTE	CLÁSICO	ENVOLVENTE	CLÁSICO	ENVOLVENTE
	HZ	HZ	HZ	HZ	HZ	HZ
m1	308 408	358	423 323 393 293	343 373	108 208 408 508	158 258 458 558
m2	542 642	593	667 567 618 518	568 617	342 442 242 742	393 492 292 792
m3	542 642	593	667 567 618 518	570 617	342 442 242 742	393 492 292 792
m4	542 642	593	667 567 618 518	568 618	342 442 242 742	393 492 292 792
m5	542 642	593	667 567 618 518	570 617	342 442 242 742	393 492 292 792
m6	545 645	596	671 567 618 521	568 620	342 445 242 745	393 492 292 792

Tabla 10. Frecuencias características de falla análisis clásico y envolvente.

DENOMINACIÓN MOTOR	BARRA CORTADA		RANURADO DE ROTOR Y BARRA CORTADA	
	CLÁSICO	ENVOLVENTE	CLÁSICO	ENVOLVENTE
	HZ	HZ	HZ	HZ
m1	39,3 60,5	10,5	296 317 396 417	367 347
m2	48,6 51,2	1,3	540 543 640 643	594 591
m3	48,6 51,2	1,2	540 543 640 643	594 591
m4	48,6 51,2	1,3	540 543 640 643	594 591
m5	48,7 51,2	1,3	540 543 640 643	595 591
m6	49,6 50,2	0,8	540 543 640 643	595 593

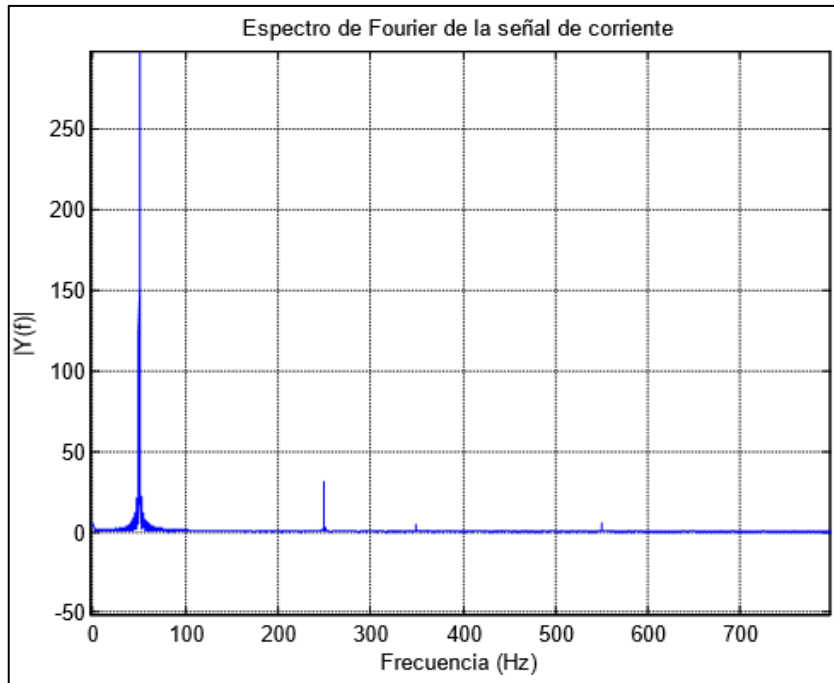


Figura 45. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m2. (11)

Se mostrará que dichos componentes de frecuencias al aplicar la transformada de Fourier a la envolvente de la misma señal Ilustración con mayor claridad y ya no dependen de la fundamental. Veamos que sucede:

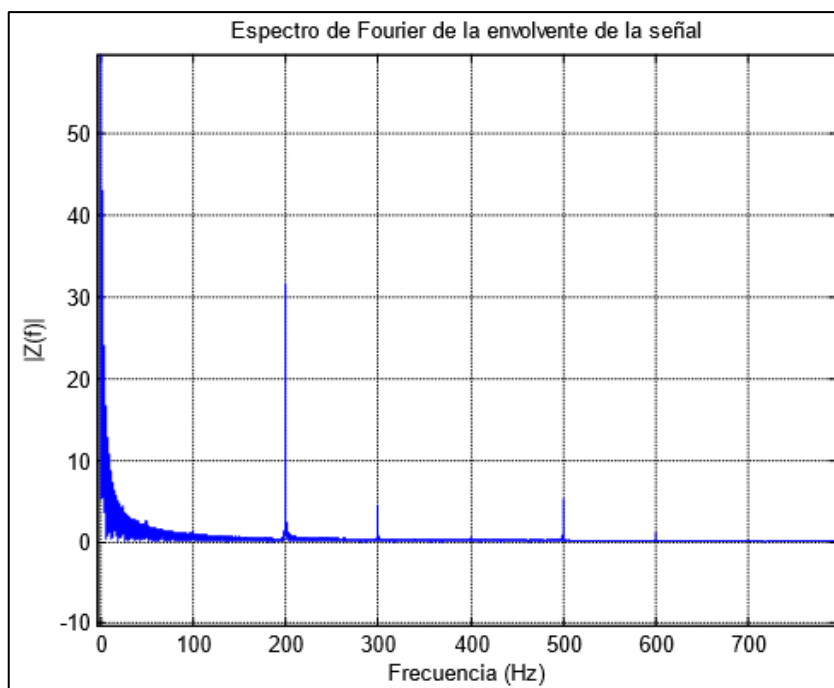


Figura 46. Respuesta de frecuencia para la envolvente Del motor M2

Al observar este primer análisis armónico, quedan de manifiesto dos cosas; primero, que el motor m2 presenta saturación con componentes de 5°, 7° y 11° armónica y, que efectivamente ya no hay dependencia del componente fundamental. El porcentaje de armónicos, si bien no es un tema de este trabajo, es factible de calcular. Por otra parte, los componentes de frecuencia relacionados con otros tipos de fallas no están presentes en este motor, descartándose alguna de las fallas descritas en el capítulo precedente. Continuando con el análisis, se muestra el espectro de Fourier para la señal y para la envolvente de la muestra m3:

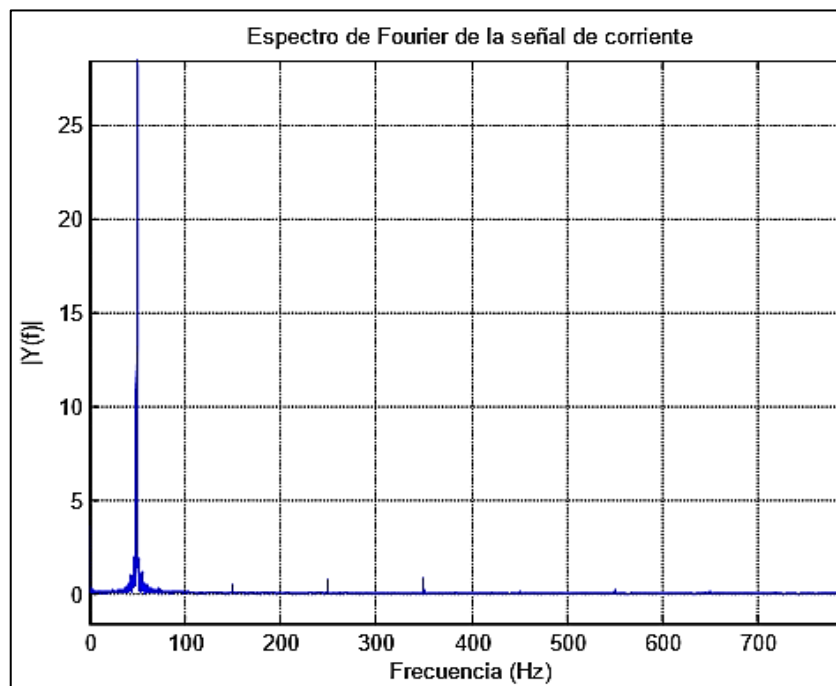


Figura 47. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m3.

Y se mostrará inmediatamente la respuesta en frecuencia de la envolvente para que el análisis en paralelo muestre rápidamente que la eliminación de la componente fundamental del análisis facilita la lectura de frecuencias de falla.

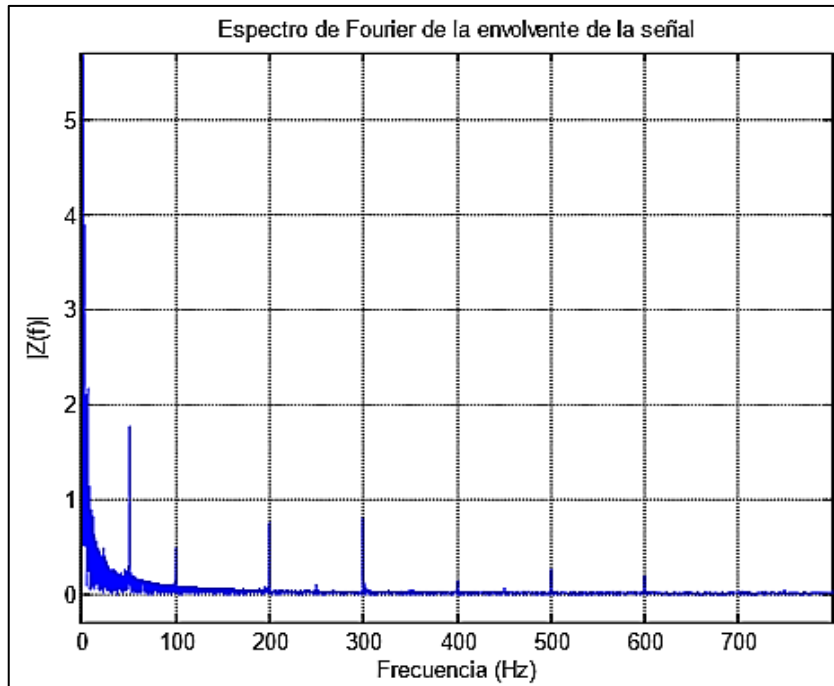


Figura 48. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor con 640 muestras en el m3.

Haciendo un zoom de este último gráfico se encuentran los componentes de frecuencia de falla.

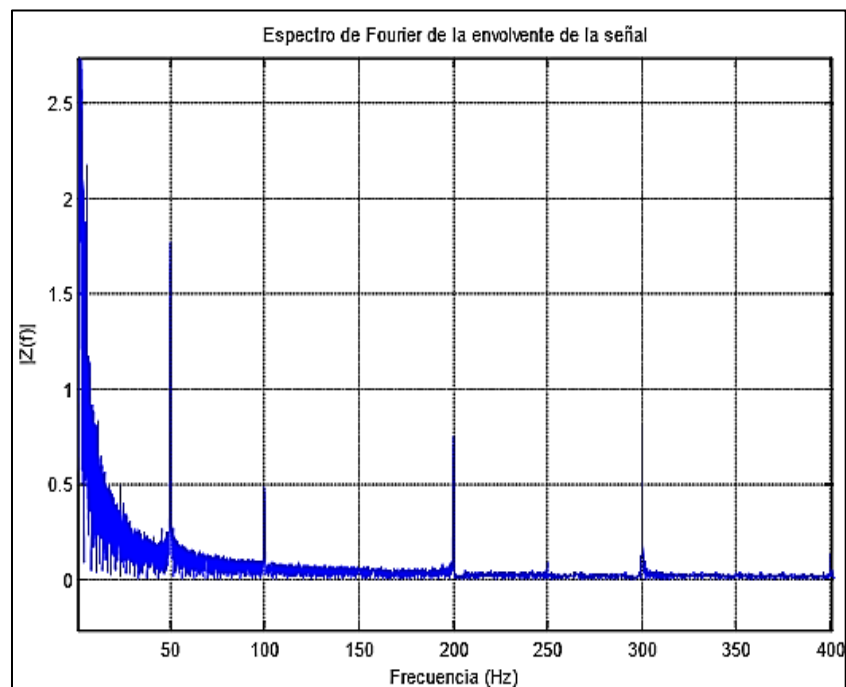


Figura 49. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3.

Lo primero que hay que decir en este caso, es que hay presencia de fallas de más de un tipo. Hay saturación del equipo como lo evidencian los componentes de 100, 200 y 300 Hz. El componente de 50 Hz podría dar a conocer que no hay un desplazamiento total del componente fundamental. El componente de 20 Hz corresponde a la excentricidad dinámica de la tabla de frecuencias de fallas. Es apenas perceptible, por tanto, podría afirmarse que el fenómeno es incipiente. Al respecto, es importante destacar que la gravedad de la falla es directamente proporcional a la magnitud del componente de frecuencia. De hecho, en el estudio citado, se constata que la dependencia es además de la intensidad de la rotura de la barra, para esa falla en particular, con el número de barras.

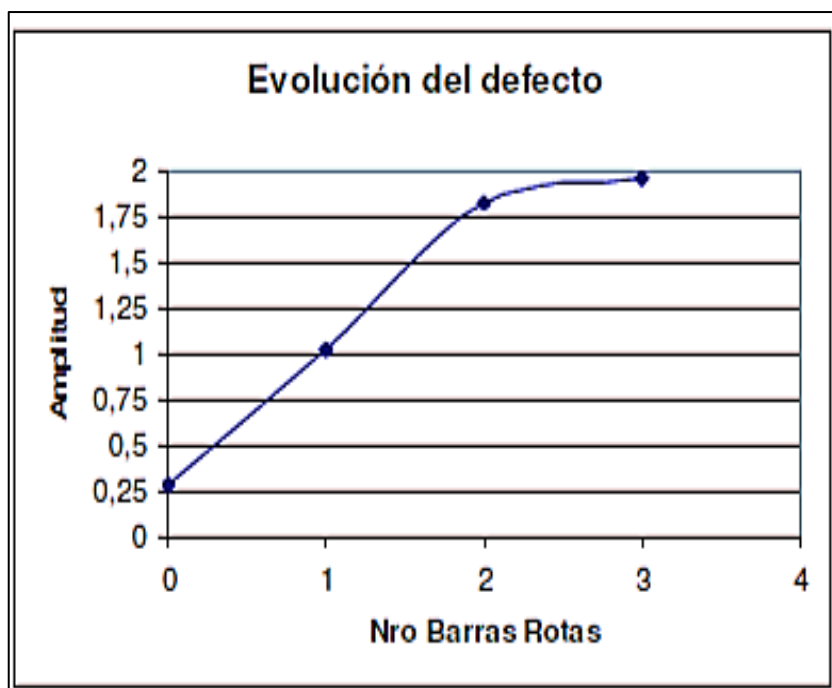


Figura 50. Zoom respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m3. (12)

Volviendo al análisis de falla del motor m3, para el componente cercano a cero, entre unos 2 y 5 Hz, la frecuencia característica más cercana es la que se indica en la tabla 4.8 como 1,3 Hz correspondiente justamente a la barra rota. La diferencia entre ambas frecuencias se explica porque al calcular el deslizamiento se tomó la velocidad de operación registrada en una instancia distinta del registro de corriente, y por lo que no necesariamente coinciden. De haber una variación, esto se reflejaría en el deslizamiento, cambiando levemente la frecuencia en el cual se manifiesta el componente relacionado con la rotura de barra. A continuación se presentará la respuesta en frecuencia para el motor m4:

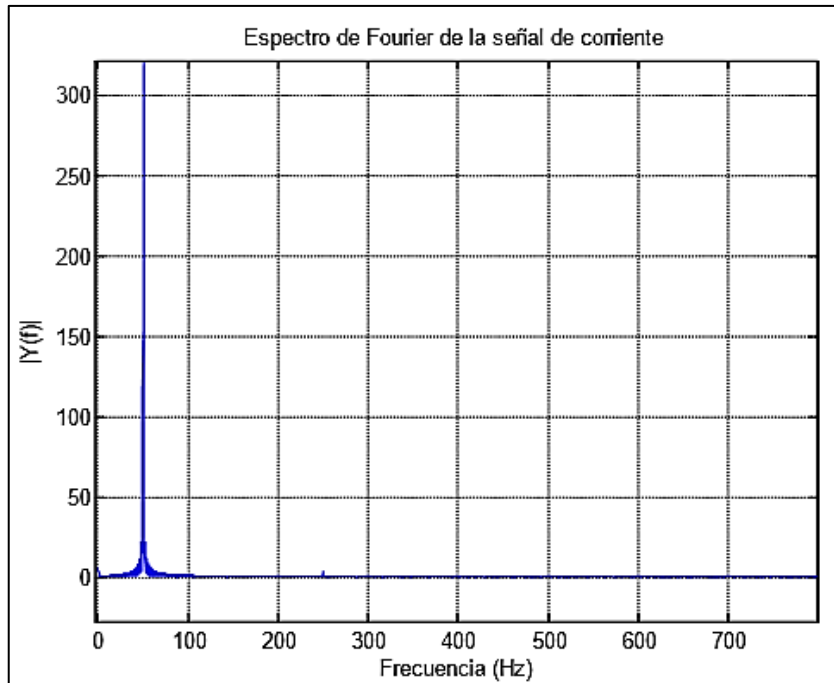


Figura 51. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor con una muestra de 400 en m4.

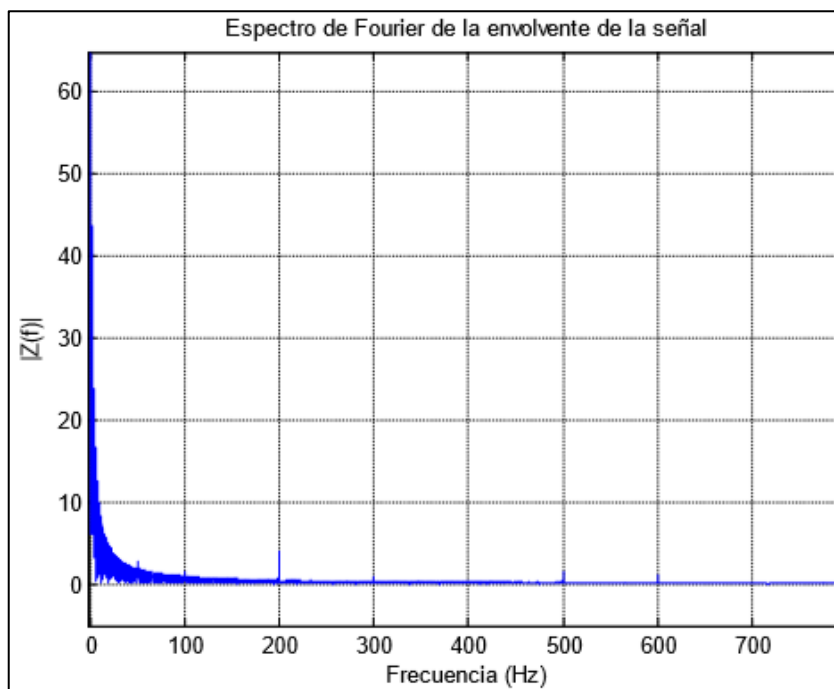


Figura 52. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m4.

En este caso no hay evidencias de falla. La saturación es apenas perceptible para los componentes de 7° y 11° armónicas. Sólo el componente de 5° se aprecia con algo de claridad. El componente de 3° armónico no existe en este caso. Se habla de un motor sano, en perfecto funcionamiento. Se someterá entonces el motor a un análisis.

Se muestra una muestra de 400.

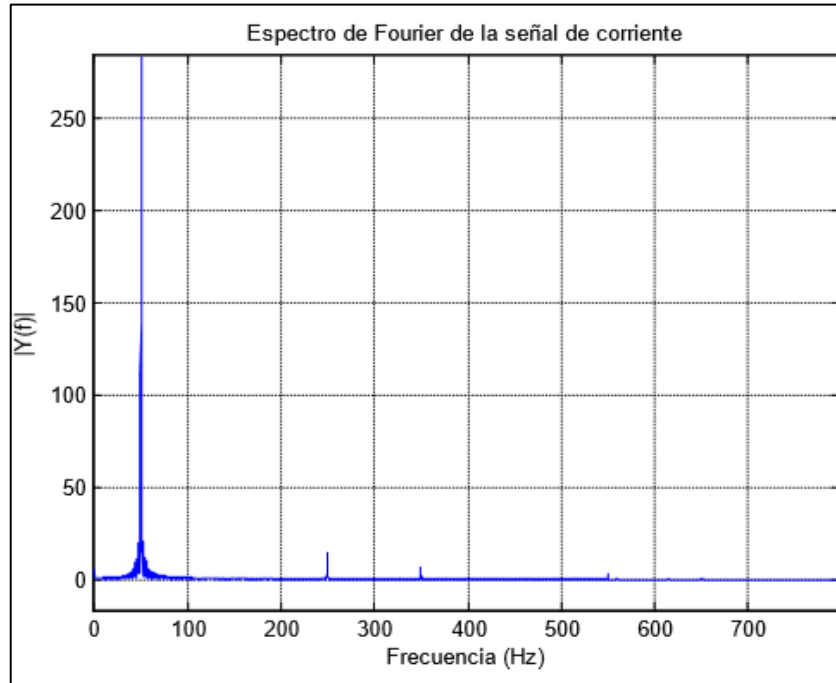


Figura 53. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor con 1600 muestras en el m5.

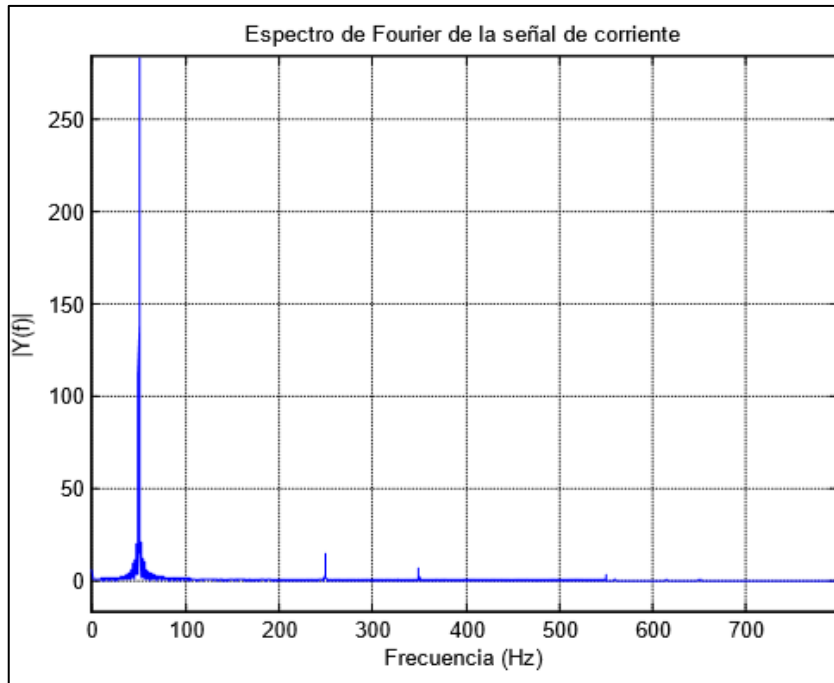


Figura 54. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m5. (13).

Es claro la presencia de los armónicos h4, h6, h10, (200, 300 y 500 Hz. respectivamente), mayor en amplitud que el caso anterior. Sin embargo, más allá de la saturación del equipo, no hay fallas mecánicas, se muestra 1600 muestras.

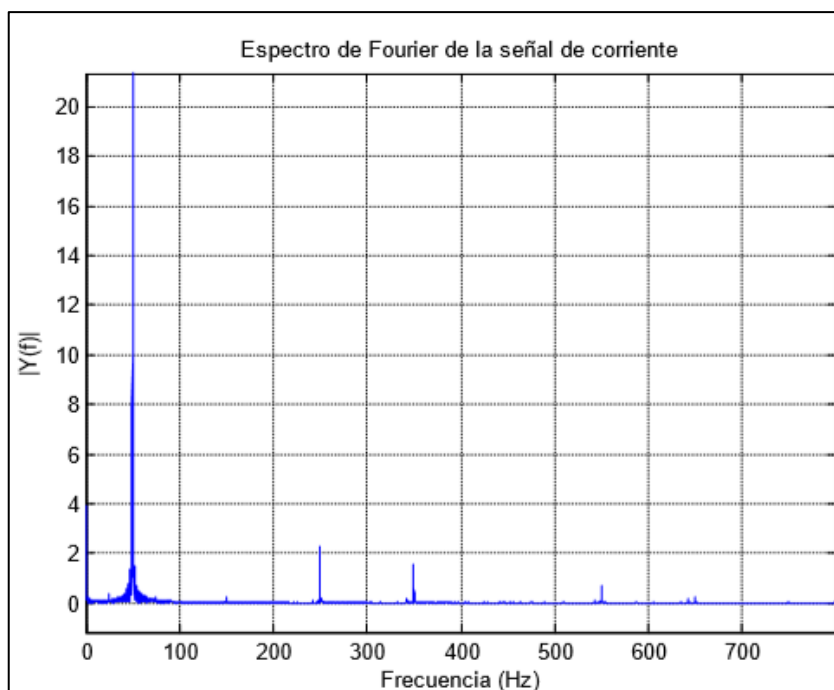


Figura 55. Respuesta en frecuencia análisis clásico de Fourier motor m6.

Se observa la presencia de armónicos y sub armónicos;

Frecuencia 25,2 y 74,8 Hz correspondiente a excentricidad dinámica. Frecuencias 150, 250 y 350 Hz que corresponden a saturación. Frecuencias 545, 645 Hz correspondiente ha Ranurado de rotor. Frecuencias 245, 345, 445 y 745 Hz correspondiente a Ranurado de rotor y saturación, con una muestra de 32000.

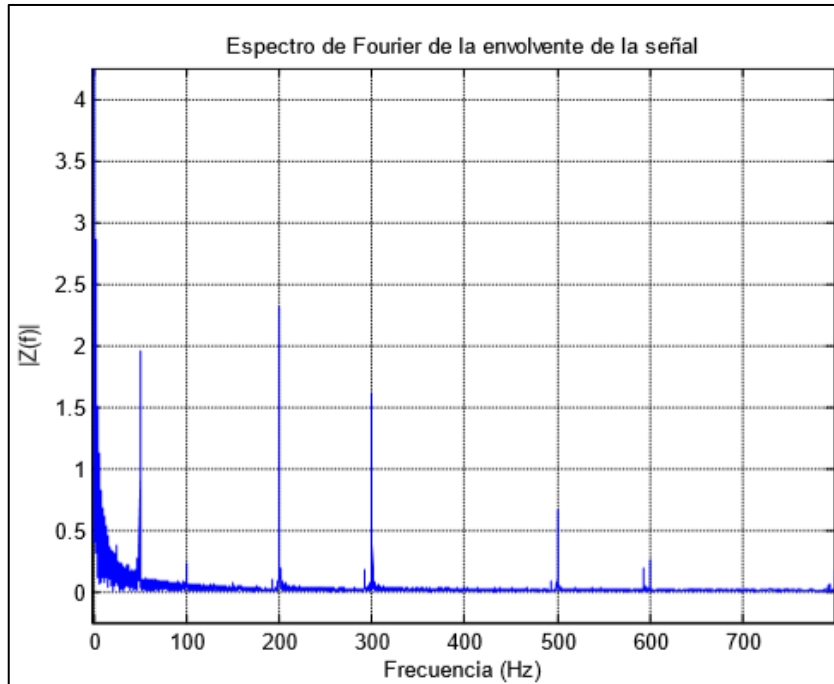


Figura 56. Respuesta en frecuencia para la envolvente del motor m6.

Se observa la presencia de armónicos y sub armónicos:

Frecuencia 24,8 Hz correspondiente a excentricidad dinámica. Frecuencia (h2, h4 y h6), 100, 200 y 300 Hz correspondiente a saturación.

Frecuencia en 595 Hz correspondiente ha ranurado de rotor.

Frecuencia en 295, 495, 595 y 795 Hz correspondiente a Ranurado de rotor y saturación al igual que en el caso del análisis de Fourier, se muestra para 32000 muestras.

4.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS

H_0 : El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert no influye directamente en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas.

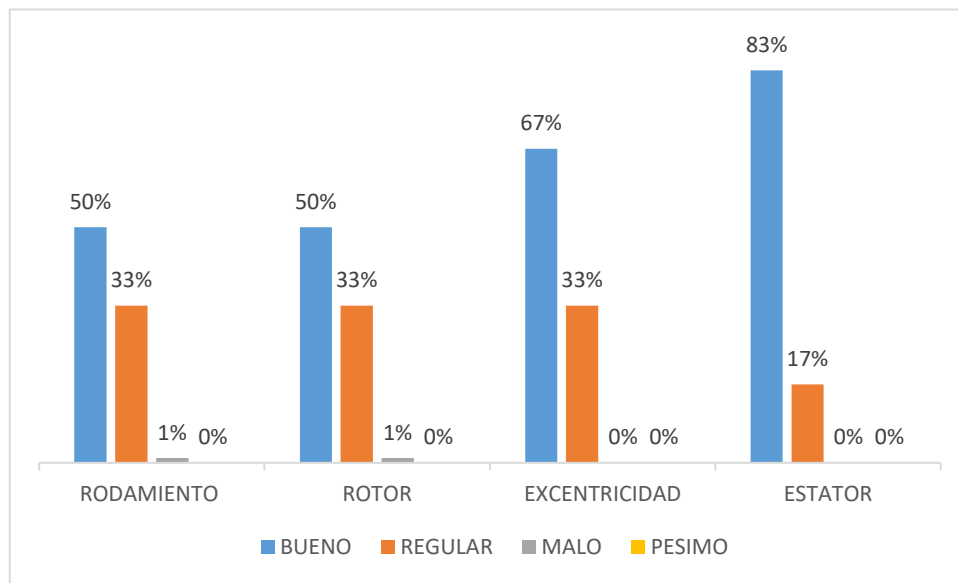
H_1 : El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas.

Tabla 11. Detalles De Las Fallas De Los Motores De Inducción Trifásicos En C.A. En La Empresa Atlas.

MOTORES	FALLAS EN RODAMIENTO				FALLAS EN EL ROTOR			
	E	ESTADO	ACCION	CONCLUSION	E	ESTADO	ACCION	CONCLUSION
M1	3.65	Regular	Mantenimiento	En los elementos rodantes	3.31	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M2	2.33	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	1.20	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M3	2.40	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	4.34	Malo	Mantenimiento preventivo	En los cojinetes o barras rotas en el rotor
M4	1.30	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	2.78	Regular	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M5	5.20	Malo	Mantenimiento preventivo	Cambio general	2.11	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M6	4.00	Regular	Mantenimiento	En las picaduras los ejes internos	6.00	Malo	Mantenimiento preventivo	Cambio general

MOTORES	FALLAS EN EXCENTRICIDAD				FALLAS EN EL ESTATOR			
	E	ESTADO	ACCION	CONCLUSION	E	ESTADO	ACCION	CONCLUSION
M1	2.65	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	1.60	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M2	3.33	Regular	Mantenimiento	En los elementos rodantes	2.34	Bueno	Mantenimiento	En los paquetes
M3	2.67	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	1.43	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M4	1.30	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	3.35	Regular	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M5	3.03	Regular	Mantenimiento	En las picaduras los ejes internos	1.25	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones
M6	1.70	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones	1.18	Bueno	Ninguno	Trabaja en buenas condiciones

Figura 57. DIAGRAMA DE RESULTADOS



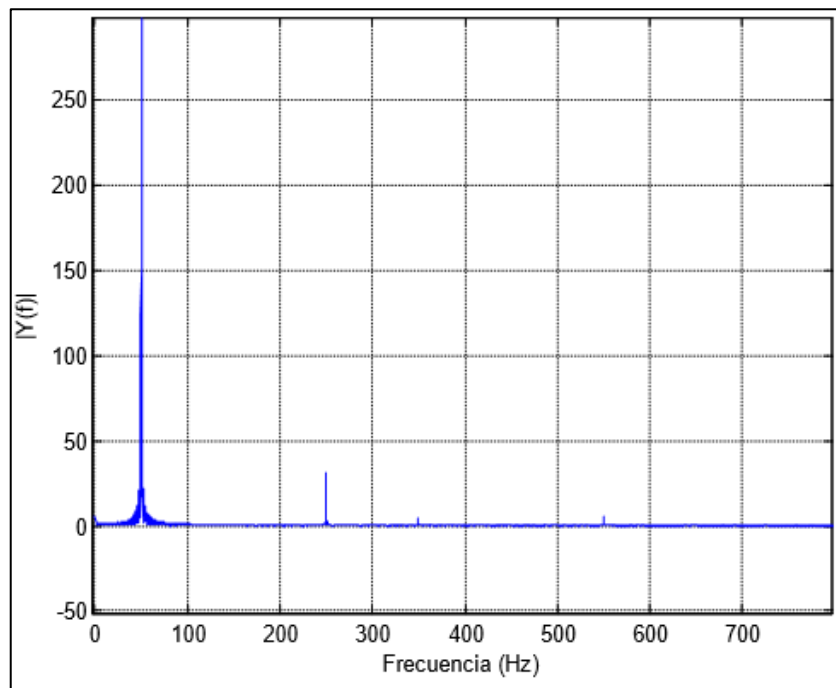
En la figura N°33 se observa los resultados obtenidos del analizador de redes realizados en los motores de inducción trifásica de C.A. de potencia de 50 kW – 550 kW son las siguientes fallas: en las fallas de rodamiento existe un 33 %, seguidamente del rotor, seguidamente de la excentricidad y del estator.

Tabla 12. Criterios de evaluación según los intervalos de fallas en los motores trifásicos en C.A.

INTERVALO DE FALLAS	CALIFICACION	ACCION
[1- 3]	Bueno	Ninguno
[3- 4]	Regular	Mantenimiento
[4- 6]	Malo	Mantenimiento Preventivo
[6- MAS]	Pésimo	Mantenimiento General

Tabla 13. Frecuencia de falla análisis clásico y de envolvente.

DENOMINACIÓN MOTOR	FRECUENCIA DE LA RED		EXCENRICIDAD DINÁMICA		SATURACIÓN	
	CLÁSICO HZ	ENVOLVENTE HZ	CLÁSICO HZ	ENVOLVENTE HZ	CLÁSICO HZ	ENVOLVENTE HZ
m1	50	0	35,0 64,8	14,9	150,250,350	100, 200, 300
m2	50	0	25,2 74,6	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m3	50	0	25,2 74,5	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m4	50	0	25,4 74,6	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m5	50	0	25,4 74,7	24,7	150,250,350	100, 200, 300
m6	50	0	25,3 74,5	24,8	150,250,350	100, 200, 300



En la figura N° 20. Vemos los resultados de frecuencia

Por lo tanto, vemos en la figura N° 20 los resultados de frecuencia que al emplear el procedimiento de análisis predictivos de motores de inducción se disminuirán las fallas en los motores de inducción, también, se evitarán muchas pérdidas económicas por las paradas imprevistas y las disminuciones significativas en los mantenimiento correctivos en la empresa altas.

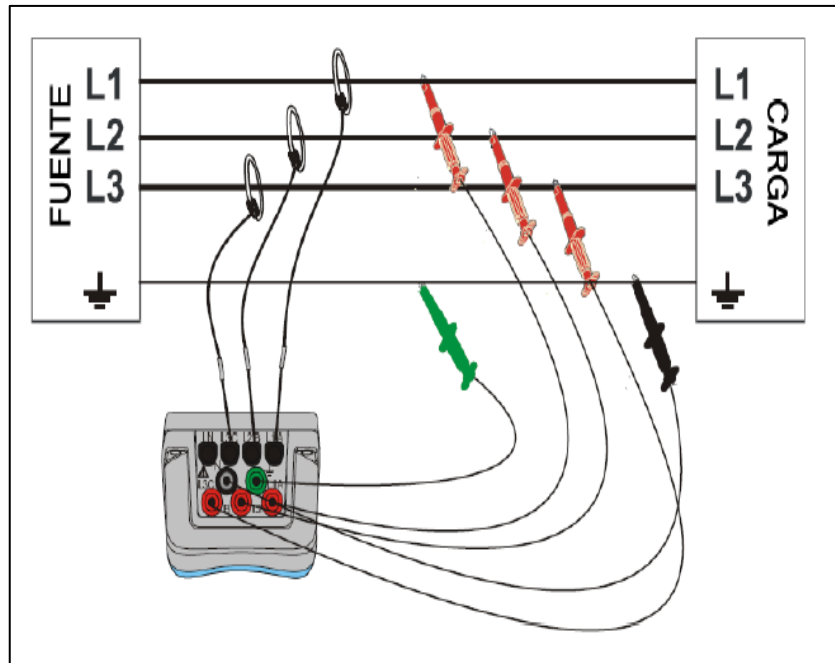
4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.5.1. PROCEDIMIENTO PARA LA INSTALACION DEL ANALIZADOR DE REDES

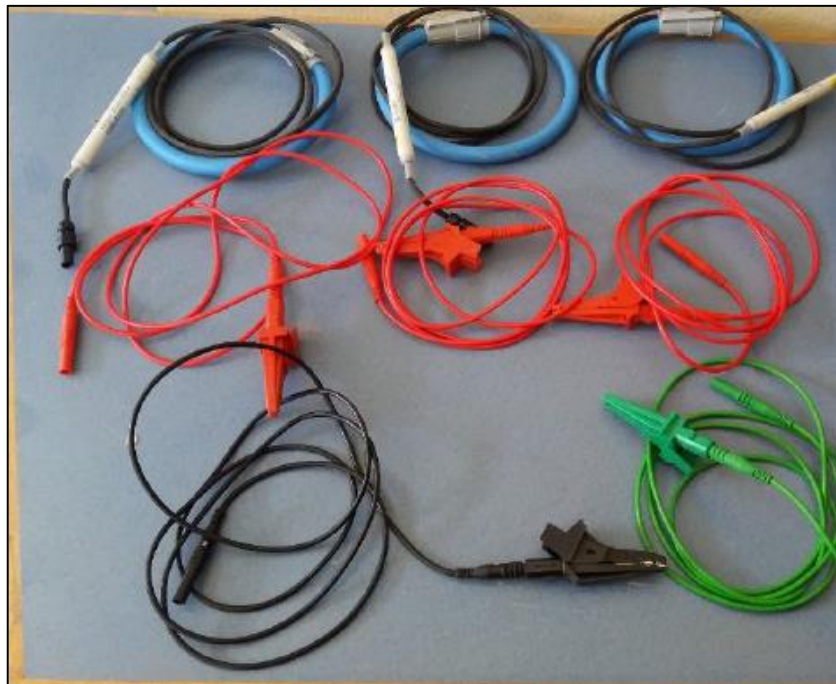
1. Primeramente tener en cuenta la norma de seguridad ya que es un factor imprescindible tanto para la instalación y la desconexión del equipo.



2. Para empezar a instalar el equipo se debe tener apagado el analizador y de esa forma poder instalar las pinzas de corrientes fase, tierra, neutro (R, S, T Y N).



3. En seguida se instala los conectores de tensión (tipo cocodrilo) en las fases y a identificada, las cuales se encuentran con sus respectivas señales y colores.



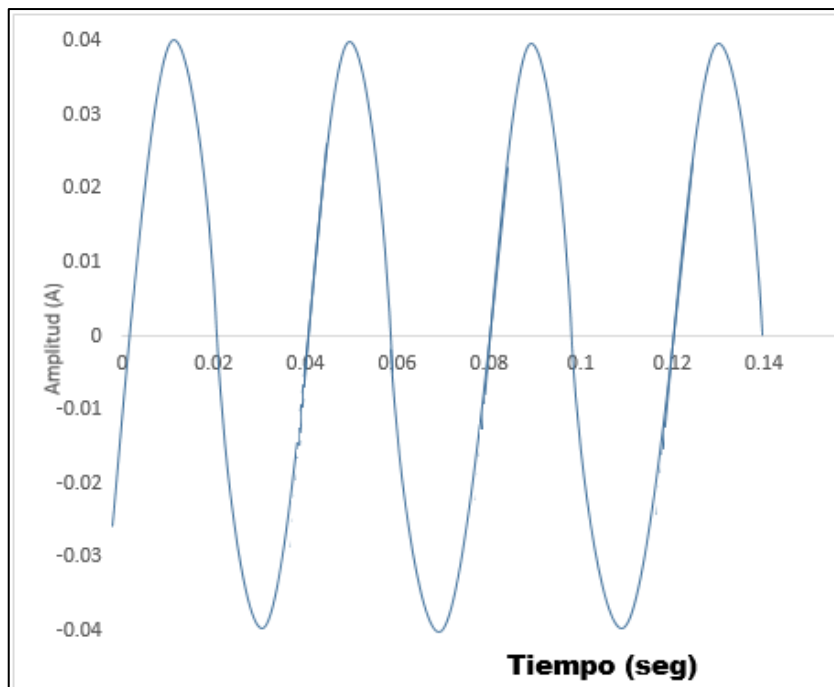
4. Terminado las conexiones se inicia el encendido del analizador de redes.
5. Una vez encendido aparece la pantalla de inicio, el cual se encuentra en menú de configuración.
6. Prosiguiendo se hace las configuraciones necesarias como la hora, la fecha, tiempo de registro, intervalos.

7. Luego de todo este proceso se empieza a pulsar el botón para que pueda empezar a registrar, el analizador registra los datos ya mencionados.

Desconexión del equipo

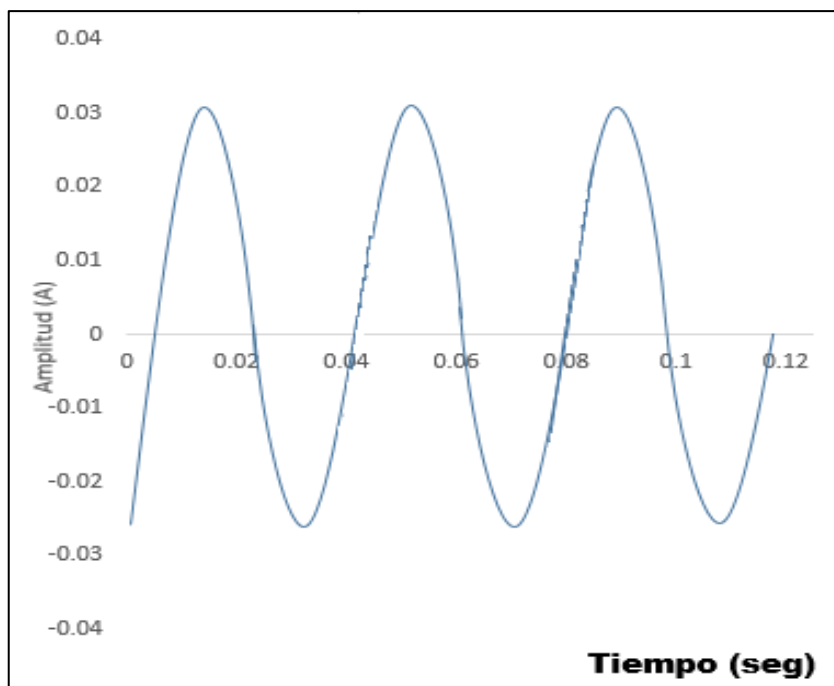
8. Apagar el equipo.
9. Desconectar los conectores de tensión y las pinzas de corriente de las barras del tablero general del analizador de redes.

MOTOR 1:



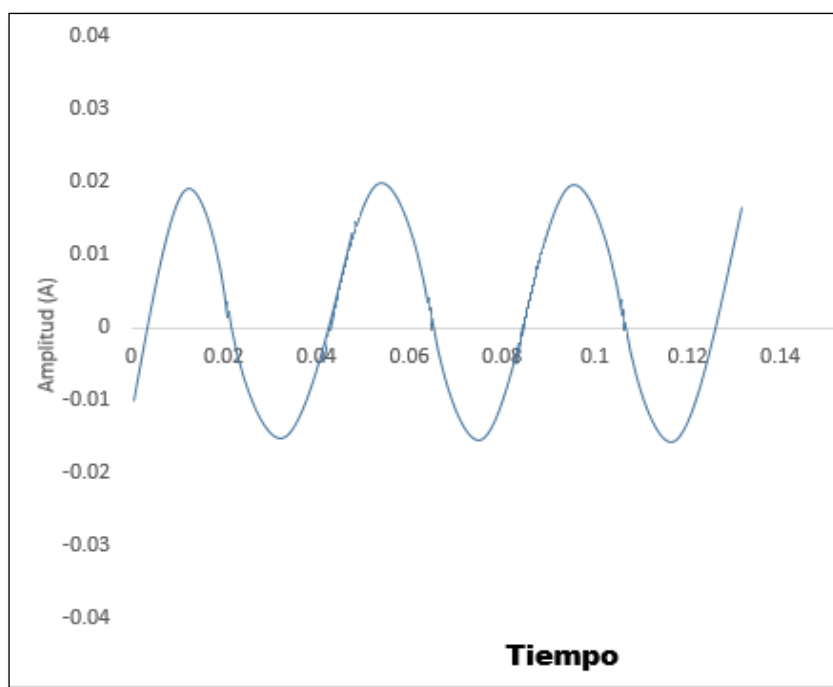
En el motor 1 realizando las pruebas con el analizador de redes vemos los resultados que no cumple con los intervalos de falla.

MOTOR 2:



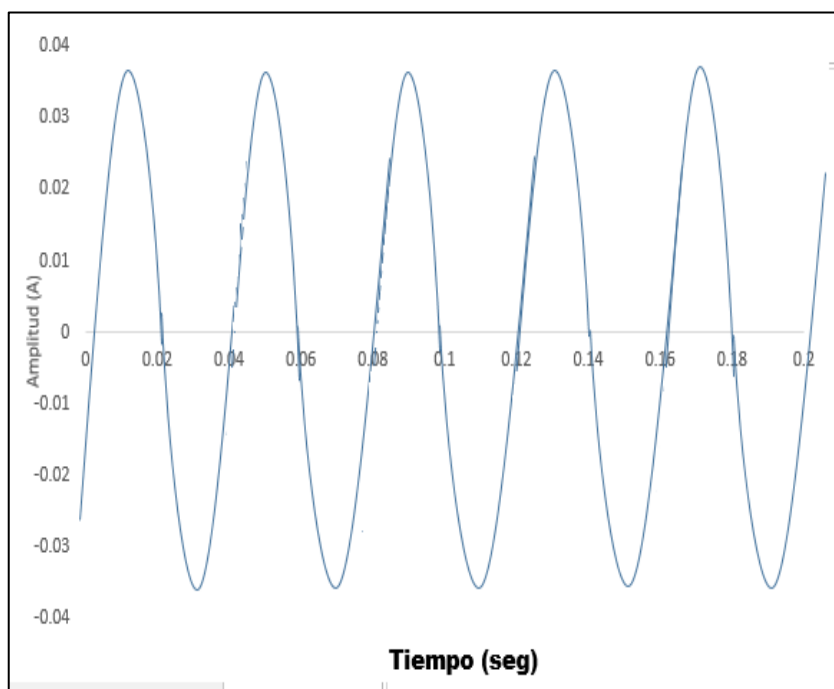
En el motor 2 realizando las pruebas con el analizador de redes vemos los resultados que cumple con los intervalos de falla.

MOTOR 3:



En el motor 3 realizando las pruebas con el analizador de redes vemos los resultados cumple con los intervalos de falla.

MOTOR 4:



motor	Falla de rodamiento	Falla del rotor	Falla de excentricidad	Falla en estator	Criterio
M1	3.65	3.31	2.65	1.60	$1 \leq N \leq 3$
M2	2.33	1.20	3.33	2.34	$1 \leq N \leq 3$
M3	2.40	4.34	2.67	1.43	$1 \leq N \leq 3$
M4	1.30	2.78	1.30	3.35	$1 \leq N \leq 3$
M5	5.20	2.11	3.03	1.25	$1 \leq N \leq 3$
M6	4.00	6.00	1.70	1.18	$1 \leq N \leq 3$

	BUENO
	REGULAR
	MALO

Los resultados obtenidos en la presente investigación nos muestra que las fallas en rodamiento, rotor, excentricidad es de 33% y el 17 % es en estator este resultado coincide con Castelli (4) quien nos menciona en la “METODOLOGÍA DE MONITOREO, DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN”.

Las transformadas de Hilbert indican de forma predictiva una determinada falla, pero la certeza de ocurrencia es medianamente probable, diría que bastante depende de la historia del motor, sobre todo, el tiempo de servicio que ha estado sometido el motor.

Por lo expuesto, se puede afirmar que si consideramos adecuadamente el procedimiento de análisis predictivo en motores de inducción se logrará una disminución de las fallas de los motores en la empresa Atlas.

También empleando el mantenimiento predictivo se identificara las fallas de los motores de inducción.

En tal sentido, esta investigación genera un concepto del adecuado conocimiento para el mejor funcionamiento y la optimización de los motores de inducción en la empresa Atlas.

CONCLUSIONES

1. Se da a conocer que las transformadas de Hilbert son una alternativa para la detección de fallas en forma predictiva en el motor de inducción. Los estudios realizados por otros autores indican que mediante el análisis de los espectros de las señales eléctricas de un motor, es posible, realizar un diagnóstico a los motores; sobre este comentario puedo opinar que al margen del análisis espectral del método de Hilbert se necesita bastante intuición y experiencia.
2. Las tecnologías más comunes en el análisis predictivo tienen limitaciones y fallan en precisar las causas de las anomalías en un motor eléctrico. Por esta razón, se da a conocer las transformadas de Hilbert como una alternativa de análisis de los motores que se encuentran en funcionamiento.
3. Se da a conocer la técnica de los transformados de Hilbert como parte del mantenimiento predictivo basado en el análisis del espectro de la corriente del estator el cual, es empleado y utilizado en tensiones de alimentación senoidal.
4. Las pruebas realizadas en un motor adquirido de la industria, según muchos autores arrojan resultados alentadores que permiten confiar en las transformadas de Hilbert, lo que significa que, en un futuro el desarrollo presentado en esta tesis será una herramienta confiable en el análisis de motores.

RECOMENDACIONES

1. Si bien las transformadas de Hilbert pueden predecir fallas en un motor de inducción jaula de ardilla; se recomienda que con los resultados arrojados por dicho método, no se deben tomar decisiones apresuradas y determinantes para poder parar el motor, sino ponerse en alerta y ver la forma de aplicar otro método para corroborarlo.
2. Se recomienda llevar un historial minucioso de los motores, porque si no se conocen las fallas anteriores que se presentan no se podrá aplicar ningún plan de mantenimiento, lo que implicaría el mal funcionamiento de los mismos y no tendría asidero la labor de la ingeniería. Se recomienda realizar un plan de mantenimiento tomando en cuenta las fallas que están ocurriendo.
3. Existe un creciente interés en el diagnóstico de fallas por parte de la industria. Muchas aplicaciones industriales garantizan el monitoreo de motores críticos para que equipos costosos y procesos delicados no se interrumpan ni se dañen. Teniendo esto en cuenta, es necesario investigar más en el área de diagnóstico de fallas de motores.
4. Al diagnosticar el problema en un motor debe involucrar todas las zonas de falla presentes como lo son: Calidad de energía, circuito de potencia, aislamiento, estator, rotor y excentricidad, para ello, deben de utilizarse tanto tecnologías dinámicas como estáticas, y estas deben de ser de tipo no destructivas para no acelerar el daño en el motor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Albino, P. I. "Impacto de la excentricidad estática en la Estabilidad transitoria de un generador de polos salientes". México : Tesis de maestría, programa de maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, SEPI - ESIME IPN, D.F., 2004.
2. Bossio, G.R., De Angelo, C. H., De pauli, A. D., García, G.O. "Diagnóstico de fallas en el rotor de motores de inducción caso de estudio: motor de 1.6 MW de bomba de alta presión". s.l. : XI reunión de trabajo en procedimiento de la información y control , 21 al 23 de septiembre (2005).
3. Carvajal, F.A., Ramirez, J. M., Arcos, L. F.,. "Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión". México : Boletín IIE,marzo- abril, (1999).
4. Castelli, M., Andrade, M.,. "Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores de inducción asincronos de inducción". Montevideo- Uruguay : URUMAN, 2007.
5. Fernandez, C. M., Garcia, M. M., Alonso, O G., Cano, R. J.M., Solares, S.J.,. "Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas". España : ABB Service S.A. - Marcombo Boixareu Editores, (2000).
6. J., Hidalgo. "Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos". Costa Rica : TERMOGRAM Consultores, 2011.
7. Jiménez Yenny, O. "Detección de problemas eléctricos en motores de C.A. Y C.D. por medio del análisis de vibraciones". México : Mantenimiento Predictivo Computarizado S.A., 2009.
8. Lafond, A. "*Energie et machines electriques*". Canada : 5e edition, *universite de sherbrooke*, 2010.
9. Leroux, A. "Moteurs et gènérateurs". Canada : 1e édition, université de sherbrooke, 2009.
10. Luo, X., Liao, Y y Toliyat, H., El - Antably, A. and LIPO, T.A. "*Multiple couple circuit modeling of Induction Machines*". 2008 .
11. IEEE. *Transactions on industry Applications*. s.l. : United States of America, 1995, Vol. 31 , 2, págs. 311 - 318.
12. P., Mangonon. "Ciencia de los materiales: Selección y diseño". México : 1era edición Prentice Hall, 2010.
13. J., Hidalgo. "Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos". Costa Rica : TERMOGRAM Consultores, 2011.
14. P, Mangonon. ciencia de los materiales: selección y diseño . México : 1era edición Prentice Hall, 2010. págs. pp. 311-318.
15. Cabanas M.F., Melero,M.G, Orcajo, G.A. Cano J.M. Y Solares, J. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas electricas rotativas . Boixareu : 1era edición, 1998.

ANEXOS

ANEXO 1: VALORES DE EFICIENCIA NOMINAL A PLENA CARGA.

Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia estándar(en por ciento)					Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia alta (en por ciento)				
Potencia nominal kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	Potencia nominal kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0.748	74.0	75.5	75.5	72.0	0.748	75.5	82.5	80.0	74.0
1.119	77.0	80.5	78.5	75.5	1.119	82.5	84.0	85.5	77.0
1.492	80.0	81.5	78.5	75.5	1.492	84.0	84.0	88.5	82.5
2.238	81.5	81.5	80.0	75.5	2.238	85.5	87.5	87.5	84.0
3.730	82.5	84.0	81.5	82.5	3.730	87.5	87.5	87.5	85.5
5.595	84.0	86.5	82.5	84.0	5.595	88.5	89.5	89.5	85.5
7.480	85.5	86.5	84.0	85.5	7.480	89.5	89.5	89.5	88.5
11.10	85.5	87.5	85.5	85.5	11.10	90.2	91.0	90.2	88.5
14.92	86.5	87.5	86.5	86.5	14.92	90.2	91.0	90.2	89.5
18.85	86.5	89.5	86.5	86.5	18.85	91.0	92.4	91.7	89.5
22.38	87.5	90.2	86.5	87.5	22.38	91.0	92.4	91.7	91.0
29.84	88.5	90.2	87.5	88.5	29.84	91.7	93.0	93.0	91.0
37.30	88.5	91.0	88.5	89.5	37.30	92.4	93.0	93.0	91.7
44.76	89.5	91.7	88.5	89.5	44.76	93.0	93.6	93.6	91.7
55.95	90.5	91.7	90.5	90.5	55.95	93.0	94.1	93.6	93.0
74.80	90.2	92.4	90.2	90.2	74.80	93.6	94.5	94.1	93.0
93.25	91.0	92.4	91.0	91.0	93.25	94.5	94.5	94.1	93.6
111.9	91.0	92.4	91.0	91.7	111.9	94.5	95.0	95.0	93.6
149.2	91.7	93.0	91.7	91.7	149.2	95.0	95.0	95.0	94.1

ANEXO 2: FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES FALLAS

Frecuencias características de las principales fallas en las máquinas de inducción. A modo de resumen, la siguiente Tabla contiene la frecuencia característica teórica de las principales fallas que se producen en las máquinas eléctricas de inducción.

Tipo de Fallo			Frecuencia Característica
ELÉCTRICOS	ESTATOR	En los Devanados (Aislamiento de la máquina)	$f_s = \left(k \pm n \cdot \frac{(1-s)}{p} \right) \cdot f$
	ROTOR	Rotura de Barras y Anillos de Cortocircuito	$f_B = f_1 \cdot (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \quad k = 1, 2, 3, \dots$
	EXTERNOS	Electrónica de Alimentación	No Frecuencia Característica.
		Efectos de la Carga	$f_{carga} = f_s \pm m \cdot f_r = f_s \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right]$

MECÁNICOS	ROTOR	Desequilibrio	Estático: En reposo el rotor siempre se para en la misma posición. Dinámico: Si no coinciden el eje de inercia y el de rotación del rotor.
		Cojinetes	$f_v [Hz] = \left(\frac{N}{2} \right) \cdot f_r \cdot \left[1 \pm \frac{b_d \cdot \cos(\beta)}{d_p} \right]$ Fallos Internos: $f_v [Hz] = \left(\frac{d_p \cdot f_r}{2 \cdot b_d} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{b_d \cdot \cos(\beta)}{d_p} \right)^2 \right]$ F. Rodamientos: Frec. Tren: $f_v [Hz] = \left(\frac{f_r}{2} \right) \cdot \left[1 - \frac{b_d \cdot \cos(\beta)}{d_p} \right]$
	ROTOR Y ESTATOR (Excentricidad)	Estática	$f_{estatica} = \left[\left((k \cdot N) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right) \right] \cdot f$
		Dinámica	$f_{dinamica} = \left[\left((k \cdot N \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right) \right] \cdot f$
		Mixta	$f_l = f \pm k \cdot f_r \rightarrow k = 1, 2, 3$ $f_r = \text{frecuencia mecánica}$
		Axial	Misma que las anteriores
	EXTERNOS	Desalineación	Proporcional a : $F = \frac{E \cdot I}{a} \cdot \text{tg}(\beta)$
		Engranajes	La más característica $f_{rg} = \frac{R_g}{60}$

MATRIZ DE CONSISTENCIA

“PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS PREDICTIVO EN MOTORES DE INDUCCIÓN MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE HILBERT”

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>Problema General</p> <p>- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>- Determinar la influencia del procedimiento del análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en los motores de inducción en la empresa Atlas.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>- X = Procedimiento de análisis predictivo</p> <p>Variable Dependiente</p> <p>- Z= Identificación de fallas</p>	<p>Población</p> <p>Se denomina población a un conjunto de elementos que contiene una o más características observables de naturaleza cuantitativa o cualitativa, para la siguiente investigación la población consta de 12 motores de inducción trifásicos de C.A. en funcionamiento en la papelería Atlas en la región de Lima Perú.</p> <p>Muestra</p>
<p>Problema Específico</p> <p>- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en rodamiento en los</p>	<p>Objetivos Específicos</p> <p>- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en rodamiento en los motores de</p>	<p>Hipótesis Específicos</p> <p>- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en rodamiento en los</p>		

<p>motores de inducción en la empresa atlas?</p> <p>- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en el rotor en los motores de inducción en la empresa atlas?</p> <p>- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en excentricidad en los motores de inducción en la empresa atlas?</p> <p>- ¿Cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en</p>	<p>inducción en la empresa atlas.</p> <p>- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en el rotor en los motores de inducción en la empresa atlas.</p> <p>- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert en identificar las fallas en excentricidad en los motores de inducción en la empresa atlas.</p> <p>- Determinar cómo influye el procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada</p>	<p>motores de inducción en la empresa atlas.</p> <p>- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en el rotor en los motores de inducción en la empresa atlas.</p> <p>- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en excentricidad en los motores de inducción en la empresa atlas.</p> <p>- El procedimiento de análisis predictivo mediante la transformada</p>	<p>En la presente investigación se tendrá como muestra a seis motores (6), a nivel de la región de Lima (sobre todo en la ciudad de Lima); motores de inducción trifásicos de C.A. incorporados desde varios puntos de energización, se tiene un amplio margen de potencias para que sea una muestra válida tomando desde 50 kW hasta 550 kW.</p> <p>Métodos de recolección de datos</p> <p>La investigación presentada es documental, experimental, explicativa y aplicada, se apoya en</p>
---	--	---	---

el estator en los motores de inducción en la empresa atlas?	de Hilbert en identificar las fallas en el estator en los motores de inducción en la empresa atlas.	de Hilbert influye directamente en la identificación de fallas en el estator en los motores de inducción en la empresa atlas.		<p>fuentes de naturaleza documental como: documentos, archivos, expedientes, revistas, etc.</p> <p>Explicativa porque su objetivo es resaltar los aspectos básicos de una problemática específica y encontrar la metodología adecuada para elaborar una investigación posterior. Aplicada porque se caracteriza en buscar la aplicación de los conocimientos adquiridos.</p> <p>Se tomará como base reportes e informes (datos históricos de cada uno de los motores) sobre los motores de inducción trifásicos de C.A.</p>
---	---	---	--	---

